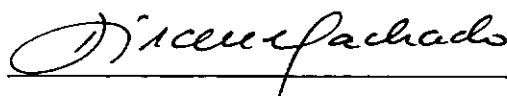


SIMULAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA URBANIZAÇÃO  
EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

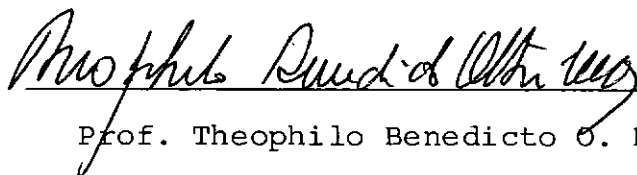
CÉLIA MARIA FERRAZ DE ANDRADE

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

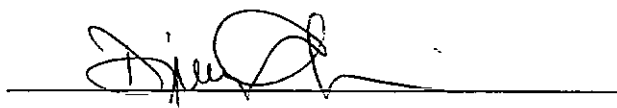
Aprovada por:



Prof. Dirceu Machado Olive  
(Orientador)



Prof. Theophilo Benedicto O. Netto



Prof. Diney Tosta de Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
NOVEMBRO DE 1985

DE ANDRADE, CÉLIA MARIA FERRAZ

Simulação do Impacto Ambiental Causado pela Urbanização em  
Bacias Hidrográficas (Rio de Janeiro) 1985.

ix, 92 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Civil,  
1976).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Urbanização em bacias hidrográficas.

I. COPPE/UFRJ

II. Título (Série)

Dedico com muito amor

a meus pais, pelo esforço

maior de criar, orientar e

educar a mim, no decorrer

dos anos e ao Gerson,

esposo querido pelo seu

apoio e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dirceu Machado Olive pela orientação e amizade durante todo o curso.

Aos professores Theophilo Benedicto Ottoni Netto e Diney T. de Oliveira pelas críticas e sugestões que permitiram um maior aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao Departamento Nacional de Obras e Saneamento por fornecer os dados de campo para a implementação prática conduzida no presente trabalho, em particular ao Dr. Paulo Pogi, Dr. Newton Carvalho e Dr. Abud Silva pelo apoio prestado.

Ao Janio pela colaboração e amizade.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuiram para a realização deste trabalho.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

SIMULAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA  
URBANIZAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

CÉLIA MARIA FERRAZ DE ANDRADE

NOVEMBRO - 1985

Orientador Prof. Dirceu Machado Olive, Ph.D

Programa: Engenharia Civil

O presente estudo procura avaliar os efeitos causados pela urbanização em uma bacia hidrográfica, através do uso de um modelo matemático de simulação.

O processo de urbanização é simulado através de alterações nos valores numéricos dos parâmetros que refletem características físicas da bacia, passíveis de alteração com a evolução do processo de ocupação da área física pelo homem tais como desmatamento, impermeabilização do solo, desenvolvimento agropecuário, etc.

A partir destas considerações é possível se prever as condições de escoamento em superfície e em calha das águas provenientes de precipitações intensas e suas consequências nos próprios núcleos urbanos ribeirinhos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SIMULATION OF AMBIENT IMPACT CAUSED BY  
URBANIZATION IN WATERSHED

by CÉLIA MARIA FERRAZ DE ANDRADE

NOVEMBER, 1985

Chairman: Dirceu Machado Olive, Ph.D.

Department: Civil Engineering

An urbanization process is simulated through the use of mathematic simulation model.

By changing numeric values of the model parameters that reflect the physical characteristics of the watershed, it is possible to foresee the evolution of the occupation process in the physical area by man, such as conditions of flow in the surface and in the streamflow coming from high precipitations and their consequences on their own urban nucleus riverain.

## INDICE GERAL

	página
- RESUMO.....	iv
- ABSTRACT.....	vi
- INDICE GERAL.....	vii
- CAPITULO I - INTRODUÇÃO.....	1
I.1 - Considerações Gerais.....	1
I.2 - Objetivo.....	2
I.3 - Apresentação do Trabalho.....	3
- CAPITULO II - DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO.....	4
II.1 - Diagrama do Modelo.....	4
II.2 - Lista de Parâmetros do Modelo Opset.....	6
II.2.1 - Parâmetros Medidos na Bacia.....	6
II.2.2 - Parâmetros Otimizados Pelo <u>Mode</u> <u>lo</u> .....	6
II.3 - Função Objetivo.....	7
II.4 - Funcionamento do Modelo.....	8
II.4.1 - Descrição do Programa.....	8
II.4.2 - Passos do Programa.....	9
II.4.3 - Processo de Otimização.....	10
II.4.4 - Funcionamento do Programa.....	10
II.5 - Condições Iniciais de Umidade.....	13
II.6 - Função das Sub-rotinas.....	13
II.6.1 - Sub-rotinas de Cálculo.....	13
II.6.2 - Sub-rotina de Constante de <u>Reces</u> <u>são</u> .....	14
II.6.3 - Sub-rotina de Parâmetro de <u>Super</u>	

fície do Solo.....	14
II.6.4 - Sub-rotina de Parâmetros de Propagação do Escoamento.....	15
II.7 - Parâmetros Determinados Pelo Modelo.....	16
- CAPITULO III - CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	23
III-1 - Descrição da Bacia.....	23
III.2 - Processo de Calibração e Otimização dos Parâmetros.....	25
III.2.1 - Desenvolvimento .....	25
III.2.2 - Estudo de Sensibilidade e Otimização dos Parâmetros.....	26
III.2.2.1 - Ajustamento de LZC....	26
III.2.2.2 - Ajustamento de SUZC...	30
III.2.2.3 - Ajustamento de ETLF...	32
III.2.2.4 - Ajustamento de BUZC...	34
III.2.2.5 - Ajustamento de SIAC...	36
III.2.2.6 - Ajustamento de BMIR...	38
III.2.2.7 - Ajustamento de BIVF...	40
III.2.3 - Parâmetros de Propagação de Onda no Canal.....	45
III.2.4 - Ajuste da Sub-rotina PRECHK.....	51
III.3 - Descrição dos Dados de Entrada.....	53
III.3.1 - Opções de Controle.....	54
III.3.2 - Dados Climatológicos.....	55
III.3.2.1 - Precipitação Horária,	55
III.3.2.2 - Precipitação Diária...	55
III.3.2.3 - Dados de Evaporação...	56
III.3.2.4 - Dados de Vazão Diária.	57
III.3.2.5 - Histograma tempo-área.	57



III.3.3 - Características Físicas da Bacia.	58
- CAPÍTULO IV - IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO.....	66
IV.1 - Simulação da Urbanização na Bacia.....	66
IV.1.1 - Desenvolvimento.....	66
IV.1.2 - Crescimento Urbano.....	66
IV.1.3 - Distribuição do Uso do Solo.....	68
IV.1.4 - Alteração das Constantes do Modelo com a Urbanização da Bacia.....	71
IV.2 - Resultados Obtidos, Análise e Discussão...	76
IV.2.1 - Resultados Obtidos.....	76
IV.2.2 - Análise dos Resultados e Discus_ são.....	86
- CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
V.1 - Conclusões Gerais.....	89
V.2 - Recomendações.....	89
- BIBLIOGRAFIA.....	91

## CAPITULO I

### I - INTRODUÇÃO

#### I.1 - Considerações Gerais

Com a explosão demográfica, a ocupação de novas terras tem resultado em desfavoráveis impactos ambientais nas áreas desenvolvidas existentes e em novas áreas em desenvolvimento. O crescimento de uma área urbana dentro de uma bacia hidrográfica causa uma drástica mudança no uso do solo e nas características físicas da mesma.

Os impactos desfavoráveis surgem quando grandes áreas de terra tornam-se impermeáveis pela locação de ruas; calçadas, telhados; parques, etc. A área na qual a chuva poderia infiltrar-se no solo é reduzida, as áreas de armazenamento naturais são removidas e o escoamento superficial pode tomar lugar prontamente nas superfícies impermeáveis relativamente lisas.

O principal efeito destas mudanças é que grande proporção do volume precipitado é transladado em escoamento superficial. O escoamento ocorre mais rapidamente e as enchentes são maiores e mais repentinas quando comparadas com as enchentes da bacia antes da urbanização.

Um instrumento bastante eficaz para o estudo desses impactos ambientais, e que possibilita o estudo das soluções para o problema, tem sido os modelos matemáticos de si

mulação hidrológica que, na sua maioria, representam as diversas fases do ciclo hidrológico através de uma série de equações matemáticas, descrevendo diversos processos hidrológicos que ocorrem dentro da bacia.

Alguns estudos foram realizados no sentido de avaliar as principais consequências advindas do processo de urbanização dentro de uma bacia hidrográfica. James (1965) utiliza o modelo STANFORD para estimar os efeitos causados pelo fenômeno da urbanização nos picos de cheia, Ross (1970) avalia os efeitos causados pela urbanização nos parâmetros do modelo, através da utilização do modelo OPSET, e outros autores que, através do uso de modelos matemáticos, analisam e discutem os seus diversos resultados obtidos.

## I.2 - Objetivo

O estudo aqui apresentado simula um processo de urbanização em uma bacia hidrográfica, o qual nos permite prever as drásticas consequências provenientes de grandes precipitações em uma bacia que experimenta um crescimento populacional acelerado.

O modelo utilizado para simulação é o modelo auto-calibrável OPSET (Optimum Set of Parameter Values) baseado na versão do Stanford Watershed Model conhecido como Kentucky Watershed Model.

A bacia utilizada para este estudo é a bacia do Rio Imbé situada na bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro.

Antes da simulação da urbanização, foi feito um estudo de sensibilidade dos parâmetros do modelo da bacia em

estudo. A partir deste estudo foram feitos ajustes nas sub-ro  
tinas de otimização e nas sub-rotinas afins.

O processo de urbanização é simulado através de alterações nos valores numéricos dos parâmetros. Estas alteraç  
ões refletem as mudanças das características físicas da baç  
cia que serão totalmente modificadas com o aumento da ocupaç  
ão de sua área.

O crescimento urbano é dado em função da curva de crescimento populacional da região, obtida a partir dos censos demográficos de 1950, 60, 70 e 80.

### I.3 - Apresentação do Trabalho

O capítulo II descreve o funcionamento do modelo.

O estudo de sensibilidade dos parâmetros, os ajustes das sub-rotinas e a calibração dos parâmetros bem como a descrição da bacia e dos dados de entrada são focalizados no capítulo III.

No capítulo IV é simulado o processo de urbaniza  
ção e é feita a análise e a discussão dos resultados.

No capítulo V são tiradas as conclusões e feitas recomendações.

## CAPITULO II

## DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

## II.1 - Diagrama do Modelo

O modelo matemático de simulação hidrológica tenta representar as diversas fases do ciclo hidrológico através de uma série de equações matemáticas cada uma das quais baseada em observações empíricas ou teóricas descrevendo diversos processos hidrológicos (infiltração, evapotranspiração, propagação de onda de cheia, etc.) que ocorrem dentro da bacia em um programa de computador. Este modelo opera por meio do uso de "reservatórios" representando as diversas condições de umidade do solo, indicando os volumes a serem transformados nos diversos tipos de escoamento; superficial, sub-superficial e subterrâneo, que somados representarão o produto final da simulação, a vazão total no curso d'água.

Em resumo, o objetivo é simular sequências de vazões contínuas durante um pré-determinado período de tempo a partir de dados climatológicos para uma bacia caracterizada pela localização geográfica ou pelas características físicas. Estas características físicas são representadas por valores atribuídos a um grupo de parâmetros contidos nas equações do modelo, valores estes que variam de bacia para bacia, alguns são lidos como dados de entrada e os outros são otimizados pelo modelo.

O modelo aqui utilizado OPSET (Optimum set of

Parameter Values) é um modelo auto-calibrável Liou (1970), baseado na versão do Stanford Watershed Model conhecido como Kentucky Watershed Model. Este modelo tem como objetivo principal determinar os valores ótimos para o grupo de parâmetros que não são lidos como dados de entrada.

O diagrama do modelo com os parâmetros estão representados na figura II.1.

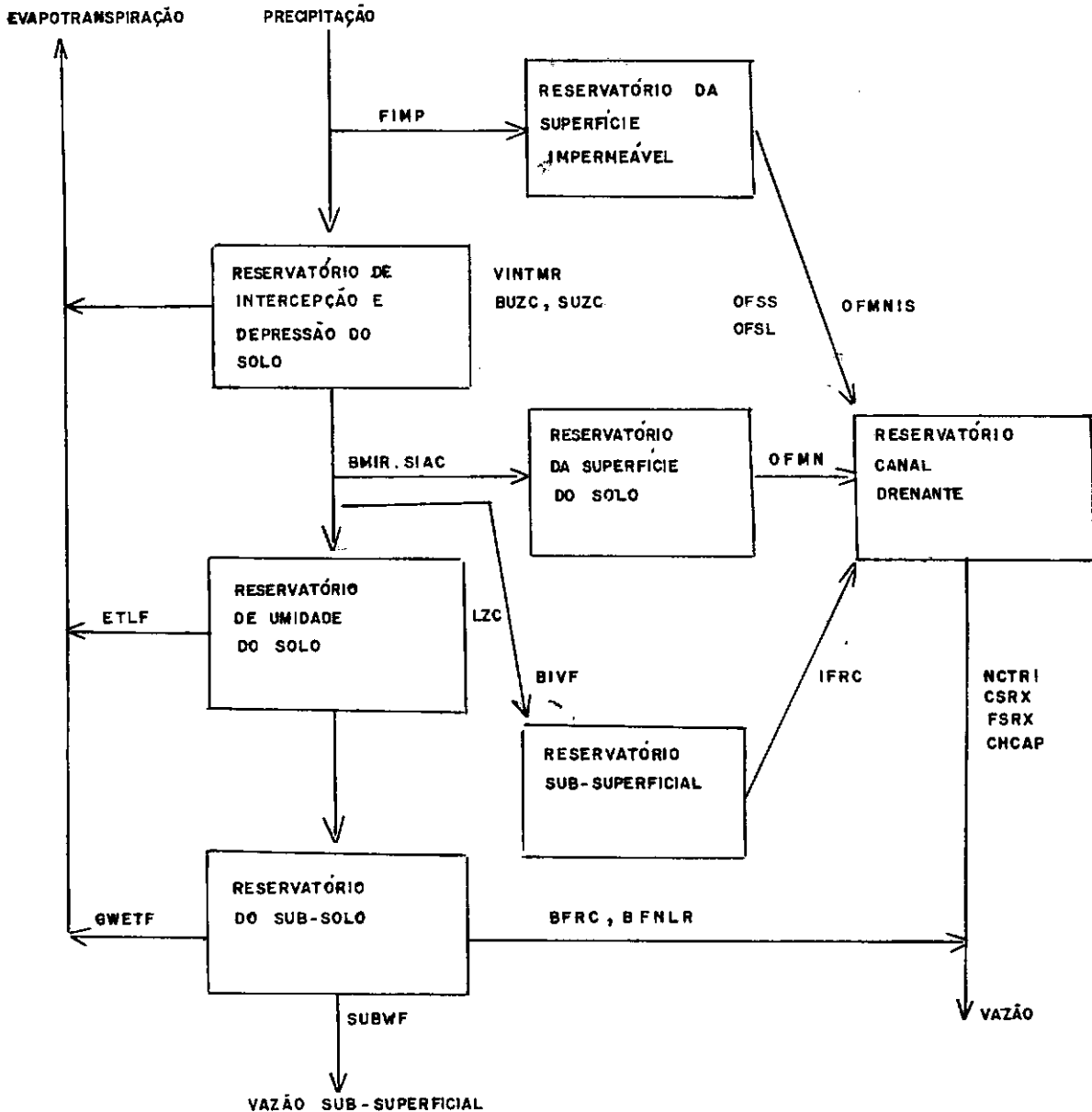


FIGURA II-1 DIAGRAMA DO MODELO

## II.2 - Lista de Parâmetros do Modelo OPSET

### II.2.1 - Parâmetros medidos na bacia

FIMP	: fração impermeável da bacia
OFMN	: coeficiente de Manning "n" do escoamento superficial nas superfícies permeáveis
OFMNIS	: coeficiente de Manning "n" do escoamento superficial na superfície impermeável
OFSL	: comprimento médio da superfície do escoamento superficial
OFSS	: declividade média da superfície do escoamento superficial
VINTMR	: taxa máxima de interceptação pela vegetação

### II.2.2 - Parâmetros otimizados pelo modelo

#### Parâmetros de recessão:

BFRC	: constante de recessão do escoamento básico
IFRC	: constante de recessão do escoamento sub-superficial

#### Parâmetros de volume de escoamento superficial:

LZC	: capacidade de armazenamento da zona inferior do solo
BMIR	: taxa básica máxima de infiltração dentro da bacia
SUZC	: fator sazonal da capacidade de armazenamento na zona superior do solo
ETLF	: fator de perda por evapotranspiração
BUZC	: fator básico da capacidade de armazenamento da zona superior
SIAC	: constante de ajustamento de infiltração sazonal

Parâmetro de volume de escoamento sub-superficial

BIVF : fator básico de volume de escoamento sub-superficial

Parâmetro de propagação de escoamento no canal

NCTRI : número de incremento no tempo de propagação

CSRX : índice de armazenamento na propagação do escoamento no canal

FSRX : índice de armazenamento na planície de inundação na propagação da onda de cheia

CHCAP : capacidade do canal-indexada à saída da bacia

Os 13 parâmetros que serão otimizados estão divididos em 3 grupos. Os 6 primeiros referentes ao solo formam um sub-grupo chamado parâmetros de volume de escoamento porque controlam o volume e a distribuição no ano do escoamento simulado e o sétimo controla o volume do escoamento sub-superficial. As duas constantes de recessão podem ser estimadas diretamente das vazões observadas. O último grupo de parâmetros referem-se à propagação do escoamento no canal.

### II.3 - Função Objetivo

O modelo usa uma função objetivo apropriada para cada um dos 3 grupos de parâmetros.

A função objetivo usada para estimar as duas constantes de recessão, minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre vazões médias diárias simuladas e registradas durante sequências de recessão selecionadas.

A função objetivo usada para estimar os seis parâmetros de volume de escoamento, minimiza a soma dos quadrados da relação normalizada entre a vazão total mensal registrada



trada e simulada. A função objetivo usada para estimar BIVF, minimiza a diferença entre o escoamento sub-superficial registrado e o simulado em um período selecionado de 3 dias.

A função objetivo usada para estimar os parâmetros de propagação de escoamento no canal, minimiza a diferença entre picos de cheia registrados e simulados num determinado espaço de tempo.

## II.4 - Funcionamento do Modelo

### II.4.1 - Descrição do Programa

O modelo OPSET é composto de um programa principal (MAIN) e 20 sub-rotinas. O programa principal controla as operações indicadas por código de opções de controle, lendo-os como dados de entrada, estabelece o processo de estimativa de parâmetros, controla a simulação da vazão e chama as sub-rotinas do programa. As sub-rotinas do programa calculam as estatísticas usadas no ajustamento dos parâmetros, ajusta os parâmetros de acordo com regras estabelecidas, verifica e ajusta, se necessário, os dados de entrada, lê os dados em formato livre e imprime os resultados pedidos.

O programa principal é dividido em 3 partes. A primeira parte lê as opções de controle (CONOPT), os dados requeridos para iniciar a rodagem do programa e calcula os valores para determinadas constantes. Nas opções de controle são incluídos o número de anos que serão lidos (NSYT), os dados de opção de controle e 3 opções de controle operacional (MNR C, NFTR, NLTR). Os dados requeridos para inicializar a rodagem do programa são: o histograma tempo-área, parâmetros com valores estimados aproximadamente para inicializar a otimiza

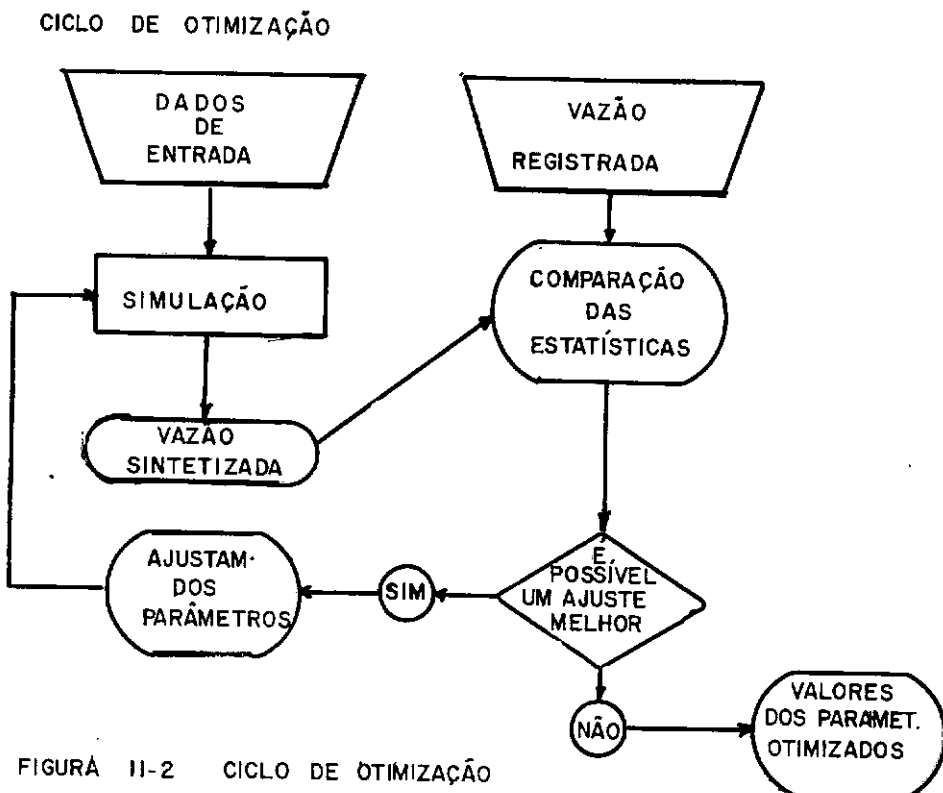
ção, dados de evaporação, vazões diárias registradas, hidrografa de cheia e dados de precipitação. A segunda parte é basicamente o "looping" interno do modelo usado para simular as vazões. A terceira parte sequencia a chamada das sub-rotinas usadas na otimização dos parâmetros.

#### II.4.2 - Passos do Programa

O programa segue os seguintes passos:

- 1) Simula um ano de vazão (sintética) a partir dos valores atribuídos ao grupo de parâmetros que serão otimizados. Esta vazão será comparada com a vazão registrada.
- 2) Estabelece regras de ajustamento para selecionar um novo grupo de valores para os parâmetros.
- 3) Estabelece uma função objetivo que julga a efetividade do ajuste da vazão simulada com a registrada.

O diagrama da figura II.2 esquematiza o ciclo de otimização.



Geralmente é preciso mais de um ciclo para que os parâmetros convirjam a valores ótimos.

#### II.4.3 - Processo de Otimização

Primeiramente o modelo, através do método dos mínimos quadrados, estima diretamente dos dados de vazões observadas as duas constantes de recessão IFRC e BFRC.

Daí começa o processo de otimização, com valores iniciais atribuídos aos parâmetros que serão otimizados, procura-se atribuir valores que se julga estarem relativamente próximos aos valores que serão encontrados pelo modelo. Um ano de vazão é simulado e comparado com a vazão registrada, a partir daí começa a fase de ajustamento dos parâmetros. A soma dos quadrados das diferenças entre as vazões mensais simuladas e as registradas (SSQM) é calculada. Em seguida os parâmetros começam a ser ajustados de acordo com regras estabelecidas por Liou (1970). Usando os valores dos parâmetros ajustados um novo ano de vazões é simulado e SSQM é outra vez calculado. O grupo de valores de parâmetros com o menor SSQM é julgado o melhor grupo, e ambos os valores de SSQM e os valores dos parâmetros são arquivados ou guardados para comparar com a próxima rodada. O processo continua até um determinado número de tentativas ou quando o último ajustamento sugere que o melhor grupo de parâmetros foi encontrado.

#### II.4.4 - Funcionamento do Programa

As diversas fases pelas quais passa o programa é chamada de TRIP, o número da TRIP denota cada fase pela qual o programa passa através do processo de simulação no programa principal (MAIN).

A TRIP 1 simula o escoamento superficial pulando a etapa de propagação da onda no canal, o procedimento começa com a simulação de um ano de vazão, com a precipitação em valores horários e com os valores iniciais atribuídos ao grupo de parâmetros. Este procedimento é chamado "ciclo grosseiro" da otimização. A sub-rotina SETFVP é chamada para ajustar LZC, SUZC, ETLF, BUZC e SIAC e a sub-rotina SETBMI para ajustar BMIR. Usando os parâmetros ajustados, um outro ano de vazões é simulado. SSQM é computado na sub-rotina SETFDI e comparado com aquele encontrado previamente. O grupo de valores dos parâmetros associado com o menor SSQM é considerado o melhor e seu valor é arquivado. O ciclo de ajustamento grosseiro continua, cada vez usando a última simulação para ajustar os valores dos parâmetros para o próximo ciclo de simulação até o valor de SSQM ser menor que 0,15 ou até o número de ciclos de ajustamentos grosseiros exceder um número mínimo de ciclos pré-determinado (MNRC) ou até o valor de SSQM ter continuamente piorado pelo menos 2 vezes.

O procedimento de otimização, então, muda para o ciclo de ajustamento fino. Nesta fase de ajustamento a simulação é feita com a chuva horária dividida em intervalos de 20 minutos. A simulação começa com os melhores valores do grupo de parâmetros arquivados no ciclo de ajustamento grosseiro. O processo de otimização do ciclo de ajustamento fino é essencialmente o mesmo do ciclo de ajustamento grosseiro, exceto que os valores de SSQM apresentados no ciclo fino, algumas vezes podem ser maiores do que do ciclo grosseiro. Os valores dos seis parâmetros de ajustamento fino com o menor SSQM é tomado como valor ótimo.

A TRIP 2 tem como objetivo estimar os 4 parâmetros de propagação do escoamento no canal CHCAP, CSRX, FSRX e NCTRI para ajustar o tempo e o pico da vazão da hidrógrafa sintetizada com a registrada. Inicialmente CHCAP e NCTRI são lidos como dados de entrada enquanto que CSRX e FSRX são tomados como 0,98. Cinco ou mais picos de hidrógrafas registradas e tempo de picos são lidos como dados de entrada. Dentro da TRIP 2, um ano de vazão é simulado usando os valores dos parâmetros otimizados anteriormente, os valores estipulados para os 4 parâmetros CHCAP, CSRX, FSRX e NCTRI e a precipitação em intervalos de 15 minutos, para bacias pequenas e em intervalos horários, para bacias grandes. A sub-rotina ADJHYD é chamada para ajustar o volume do escoamento total em relação ao volume registrado. O escoamento sintetizado ajustado fornece a hidrógrafa de entrada para ser transportada através do sistema de canal onde é comparada com a hidrógrafa registrada correspondente. O processo de estimação chama a sub-rotina SETHRP para encontrar o melhor par de valores de NCTRI e SRX que por sua vez chama a sub-rotina SETSRP para determinar os melhores valores de CSRX e FSRX.

Quando a bacia é pequena, com o tempo de concentração menor que 1,5 horas e a propagação da vazão é feita em intervalos de 15 minutos (CONOPT(2)=0) a sub-rotina PREPRD é chamada no começo da TRIP 2 para distribuir a precipitação horária em períodos de 15 minutos.

Caso a bacia seja grande com tempo de concentração maior do que 3 horas a propagação é feita em intervalos horários (CONOPT(2)=1) e a sub-rotina PREPRD não é chamada.

A TRIP 3, com os valores finais dos parâmetros

otimizados, simula um ano de vazão em intervalos de 15 minutos para bacias pequenas e em intervalos horários para bacias grandes. Este ano de vazão simulado poderá ser comparado com o registrado e a partir daí poderá verificar-se a efetividade do processo de simulação.

## II.5 - Condições Iniciais de Umidade

O ano começa com alguma quantidade de água armazenada na superfície do solo na zona superior do solo, dentro do solo, abaixo do lençol freático etc., mas devido o ano hidrológico começar em 1º de setembro, quando a umidade armazenada na bacia está próxima do nível mínimo devido ao seu longo período precedente de seca, o reservatório de escoamento superficial (OFUS), o reservatório de escoamento superficial em superfície impermeável (OFUSIS), o escoamento direto (URHF), o reservatório superior (UZS) e o armazenamento sub-superficial (IFS) são iguais a zero. O armazenamento de água subterrânea (GWS) é estimado dentro do modelo a partir de dados do escoamento básico dos primeiros dias de setembro. O reservatório de armazenamento da zona inferior (LZS) é diretamente dependente da capacidade de armazenamento da zona inferior (LZC) e seu valor inicial é tomado igual a metade do valor de LZC. Estes reservatórios estão diretamente ligados ao tipo de solo da bacia.

## II.6 - Função das sub-rotinas

### II.6.1 - Sub-rotinas de Cálculo

DAYNXT - O número de dias do ano dentro do programa vai de 244 para primeiro de setembro até 365 para 31 de dezembro, de 1 para 1º de janeiro até 59 para 28 de fevereiro, 366 para 29 de fevereiro em caso de ano bissexto e de 60 para 1º de

março até 243 para 30 de agosto. Devido a ordem requerida dos dias não poderem ser convenientemente prescrita por um loop "DO" no Fortran, a sub-rotina DAYNXT é chamada para determinar o número do próximo dia do ano a partir do número do dia dado.

DAYOUT - Lista em forma tabular os valores das vazões para os dias dos respectivos meses do ano.

PRECHK - É utilizada para checar se existe alguma anomalia nos dados registrados "precipitação-vazão" e ajusta a precipitação quando for necessária.

PREPRD - Divide a precipitação horária total em períodos de 15 minutos em caso de pequenas bacias.

## II.6.2 - Sub-rotinas de Constante de Recessão

RECESS - Examina as vazões diárias através do ano, indicando as sequências de recessão para poder determinar as duas contantes de recessão BFRC e IFRC.

SET2RC - É usada para estimar as duas constantes de recessão BFRC e IFRC para cada sequência de recessão.

SET1RC - É usada para estimar a vazão básica de recessão da sequência de vazão total diária determinada ser essencialmente vazão básica.

## II.6.3 - Sub-rotinas de Parâmetros de Superfície do Solo

SETFVP - Ajusta os valores dos 5 parâmetros de volume de vazão LZC, SUZC, ETLF, BUZC e SIAC durante o processo de estimação do melhor grupo de valores para os 6 parâmetros de volume de vazão.

SETFDI - Calcula os índices da diferença entre volumes de va

zões mensais sintetizados e registrados (SSQM) para determinar o quando cada parâmetro necessita ser ajustado.

SETBMI - Ajusta o valor do parâmetro de controle da taxa de infiltração BMIR.

SETRBF - Calcula os volumes do escoamento sub-superficial e do escoamento básico.

SETBIV - Ajusta o valor do parâmetro BIVF controlando a parte da unidade que não infiltra no solo indo para o escoamento sub-superficial de maneira a determinar um ajuste melhor entre o volume de escoamento sub-superficial registrado e sintetizado.

II.6.4 - Sub-rotinas de Parâmetros de Propagação do Escoamento no Canal

STRHRS - Seleciona o tempo de início e de fim da vazão de entrada no canal em qualquer lugar da bacia contribuindo para determinados picos de cheias de modo que vazões de entrada simuladas entre estes dois tempos possam ser salvas no teste de propagação necessária para selecionar um grupo ótimo dos parâmetros de propagação do escoamento no canal.

ADJHYD - Ajusta os volumes das vazões da hidrógrafa sintetizada de entrada no canal que correspondem aos volumes das vazões da hidrógrafa registrada.

SETHRP - Determina o melhor valor para NCTRI e SRX para cada um dos cinco picos da hidrógrafa especificada na entrada de dados.



FIXTRI - Durante a otimização dos parâmetros de propagação do escoamento no canal se faz necessário efetuar a propagação com o valor de NCTRI diferente de NBTRI, assim sendo, os elementos do histograma tempo-área devem ser ajustados. A sub-rotina FIXTRI rearruma os valores destes elementos (NBTRI e BTRI).

TIMERT - É usada para efetuar os testes repetitivos de propagação requeridos na pesquisa dos valores dos parâmetros de propagação do escoamento no canal, executando o incremento de tempo do escoamento no canal.

STORRT - Funciona junto com a sub-rotina TIMERT e é usada para executar as tentativas repetidas de propagação requeridas na pesquisa dos valores dos parâmetros de propagação, a qual melhor avalia os atenuados efeitos observados no armazenamento quando o escoamento movimenta-se através do canal.

SETSRP - Determina o valor dos dois parâmetros de propagação CSRX e FSRX.

## II.7 - Parâmetros Determinados pelo Modelo

As duas constantes de recessão BFRC e IFRC são estimadas dentro do modelo pela técnica dos mínimos quadrados. A sub-rotina RECESS é chamada para selecionar as sequências de vazões de recessão, dos dados registrados de vazões diárias, que por sua vez chama as sub-rotinas SET2RC e ou SET1RC para determinar as 2 constantes de recessão de cada sequência selecionada. O valor final dessas constantes são tomados como a média ponderada em função do comprimento da sequência, porque sequências longas proporcionam melhores resultados.

Quando a sequência de recessão é essencialmente vazão básica a sub-rotina SET2RC é descartada e a SET1RC é chamada para calcular a constante de recessão.

BUZC e SUZC são os índices usados para estimar a capacidade de armazenamento da superfície do solo. São usados para calcular a capacidade nominal de armazenamento de umidade na zona superior do solo (UZC) de acordo com a equação II.1

$$UZC = SUZC (AEX90) + BUZC \left( e^{-2,7 \frac{LZS}{LZC}} \right) \quad (II.1)$$

onde:

AEX90 é um índice de evaporação antecedente ( $K=0,90$ )

LZS/LZC é um índice da umidade contida no solo subjacente

A zona superior armazena umidade, a qual, contribui para o escoamento, até evaporar-se ou lentamente infiltrar-se no solo. A retenção de umidade depende da relação UZS/UZC de acordo com a relação mostrada na figura II.3

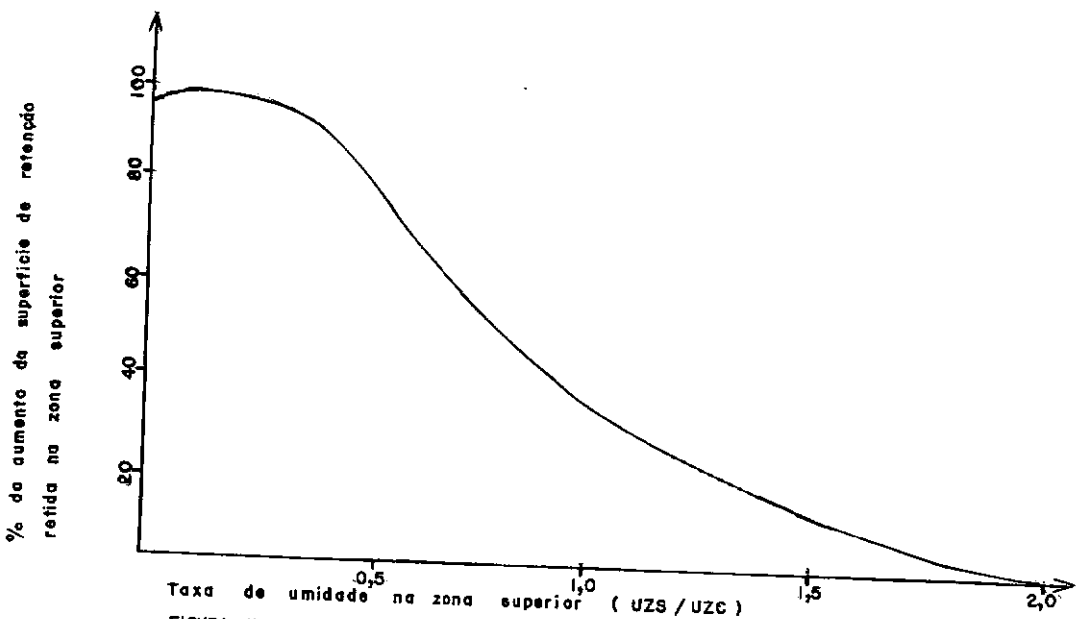


FIGURA II-3. MODELO PARA ESTIMAR O ARMAZENAMENTO DA ZONA SUPERIOR DO SOLO (ROSS 1970)

LZC é o índice da capacidade do solo armazenar água, que é aproximadamente igual ao volume da capacidade do solo reter água. Diminuindo LZC no modelo tem o mesmo efeito de reduzir a capacidade do solo reter umidade. Assim, a vazão total simulada aumentaria. Infiltração retardada ou percolação ocorre da zona superior para a água subterrânea ou reservatôrios subterrâneos quando a taxa  $UZS/UZC$  excede a taxa  $LZS/LZC$ . A percentagem que a infiltração direta ou retardada entra no reservatório subterrâneo é função da taxa de armazenamento  $LZS/LZC$ , onde LZS é a quantidade de água no reservatório inferior e LZC é o nível de armazenamento, onde 50% de toda umidade que entra move-se para o reservatório subterrâneo. Esta relação é mostrada na figura II.4

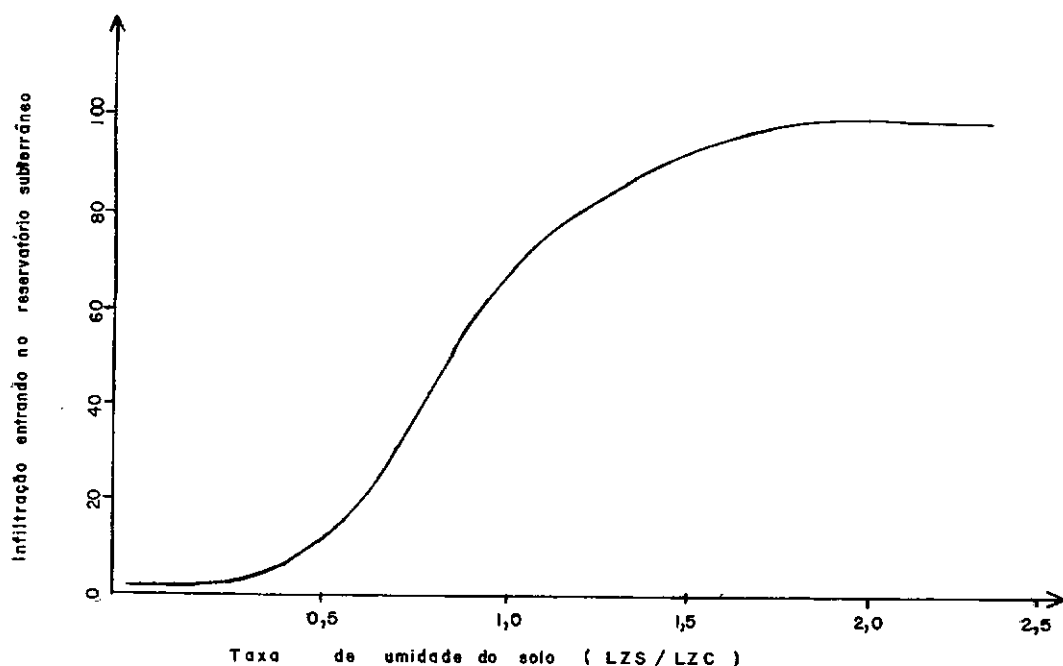
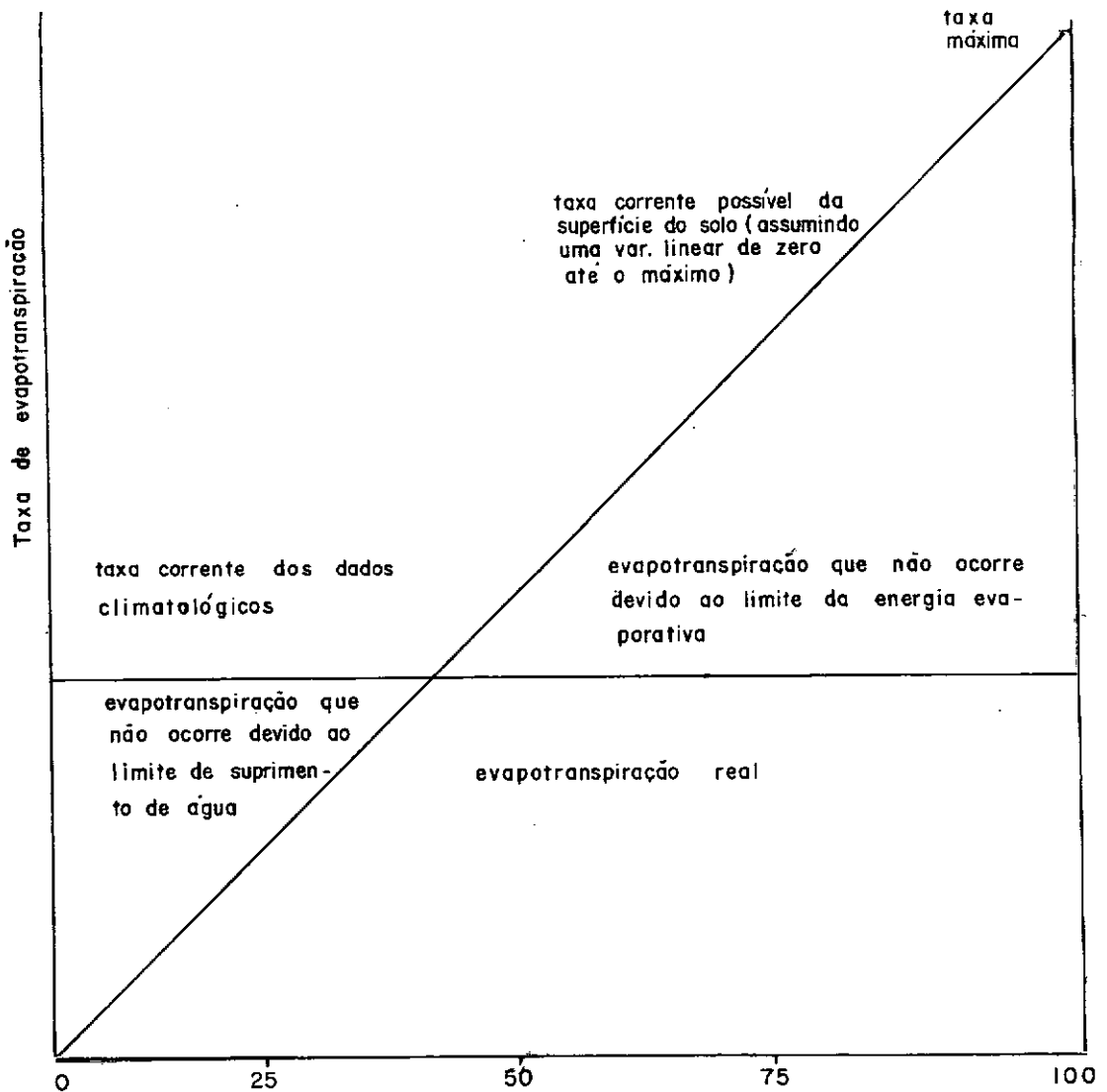


FIGURA II- 4 modelo para estimar a infiltração entrando no reservatório de água subterrâneo ( ROSS 1970 )

ETLF é um índice usado para estimar a taxa máxima de evapotranspiração que pode ocorrer dentro da bacia.

Esta taxa máxima é então usada para estimar a evapotranspiração atual corrente de maneira descrita na figura II.5, representada pela equação II.2

$$\text{Taxa máxima} = \text{ETLF} \times \text{LZS/LZC} \quad (\text{II.2})$$



Fração da bacia com menos do que a taxa de evapotranspiração indicada

FIGURA II-5 modelo para estimar a taxa de evapotranspiração atual (ROSS 1970)

Um valor alto de ETLF deve ser usado para bacias contendo grande quantidade de árvores de grande porte.

Crawford (1966) sugere que os valores de ETLF sejam estimados ou interpolados da tabela II.1

Cobertura Vegetal	ETLF
Solo aberto	0,20
Grama	0,23
Floresta leve	0,28
Floresta pesada	0,30

TAB. II 1 VALORES DE ETLF

SIAC é um fator de evapotranspiração que relaciona taxas de infiltração com taxas de evaporação, para o calculo da infiltração mais rápida, durante períodos quentes.

BMIR é o índice básico de infiltração, usado para controlar a taxa de infiltração. Uma vez que a taxa de infiltração varia consideravelmente de ponto a ponto da bacia e sendo o escoamento maior em pontos com pequenas taxas de infiltração, um valor médio para infiltração não seria apropriado . Uma frequência de distribuição acumulativa da capacidade de infiltração é utilizada. Esta distribuição de acordo com a figura II.6 é assumida ser linear, igualada ou excedida de zero, por todos os pontos da bacia, chegando a um valor máximo , alcançado somente em um só ponto da bacia.

A equação usada para relacionar a capacidade máxima de infiltração de toda a bacia, aplicada a algum ponto particular no tempo, determinada pelo reservatório de umidade

do solo dentro da bacia, naquela hora e a estação do ano estão resumidos na figura II.6 e nas equações II.3, II.4 e II.5.

$$CMIR = \frac{\text{CONSTANTE} \times SIAM \times BMIR}{\text{FUNÇÃO (LZS / LZC)}} \quad (II.3)$$

$$SIAM = \text{FUNÇÃO (SIAC)} \quad (II.4)$$

$$CIVM = BIVF \times \text{FUNÇÃO (LZS / LZC)} \quad (II.5)$$

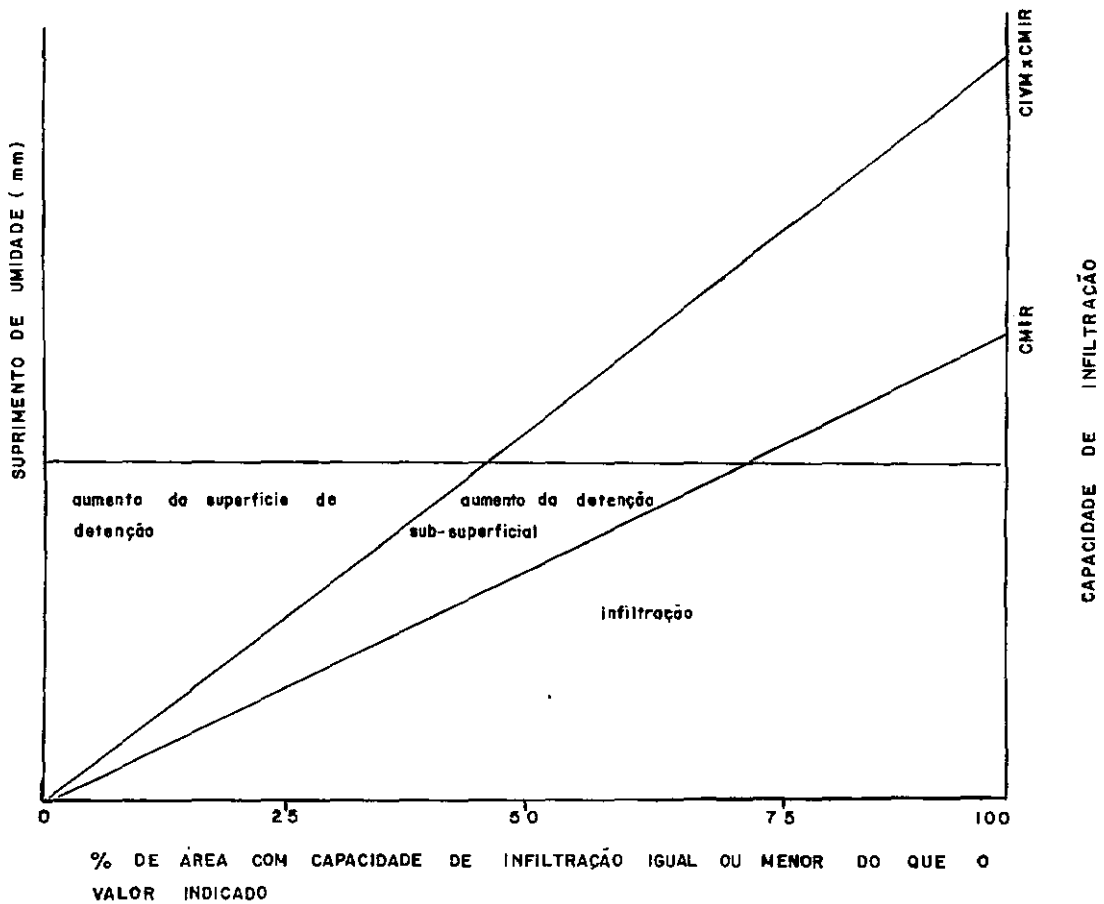


FIGURA II-6 MODELO PARA ESTIMAR A CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO ( ROSS 1970 )

BIVF é o índice que controla o tempo de distribuição e a quantidade de umidade entrando no escoamento sub-superficial. Aumentando-se BIVF causar-se-á mais escoamento sub-superficial, aumentar-se-á o volume de CIVM (figura II.6) e reduzir-se-á o pico de cheia, estendendo-se o lado de recessão da hidrógrafa.

CSRX é o parâmetro de propagação usado no cálculo para o armazenamento do canal quando a vazão no canal é menor do que metade da sua capacidade CHCAP. Os efeitos do armazenamento no canal são simulados obtendo-se o tempo de transporte da hidrógrafa até o exultório da bacia através de reservatórios imaginários.

A equação de propagação do reservatório usada é a equação II.6

$$O2 = \bar{I} - CSRX ( I - O1 ) \quad (II.6)$$

onde:

O2 é a vazão de saída do reservatório no fim do intervalo de tempo selecionado e O1 é a vazão de entrada no começo do intervalo e  $\bar{I}$  é a vazão média de entrada no reservatório.

FSRX é o parâmetro de propagação usado no cálculo para o reservatório do canal mais a planície de inundação quando a vazão é maior do que duas vezes a capacidade do canal. Quando grandes vazões de cheia são para serem propagadas, FSRX é substituído por CSRX na equação II.6.

## CAPÍTULO III

## CALIBRAÇÃO DO MODELO

## III.1 - Descrição da Bacia

A bacia hidrográfica utilizada no presente estudo foi a do Rio Imbé, localizada numa área praticamente rural sem concentração populacional e industrial, consistindo em sua quase totalidade de fazendas de plantação de cana de açúcar e criação de gado apresentando boas condições de se urbanizar por estar perto de centros produtivos.

Os dados relativos ao referido rio, foram obtidos junto ao DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento).

O rio Imbé, localizado na bacia de Campos, tem suas cabeceiras entre as serras da Piedade e do Imbé, na altura da cidade fluminense de Trajano de Moraes, e a uma altitude da ordem dos 840 metros. Do princípio ao fim, seu curso com aproximadamente 70 Km, desenvolve-se na direção sudoeste.

Seus afluentes são inúmeros, evidenciando ser bastante drenável, apesar de rio de montanha, destacando-se o rio Zangado pela margem direita e o Mocotó pela esquerda. Os trechos superior e médio de seu curso drenam uma região bastante acidentada, onde há evidência de meandros de raios pequenos. A área de drenagem é da ordem dos 750 Km<sup>2</sup>.

O curso superior do Imbé drena áreas do tipo



latossolo vermelho, enquanto os cursos médio e inferior banham terrenos do tipo latossolo alaranjado. O amplo vale bem espraiado é aluvial recente.

O latossolo é caracterizado pelo excesso de chuva sobre a evapotranspiração potencial durante a maior parte do ano, a presença da lixívia se explica pelo fenômeno de ocorrência de chuvas anuais superiores a 2.000 mm e temperatura anual em torno dos 25°C. Os registros de chuvas, coletados em pontos do superior e do médio Imbê, comprovam esse limite pluvial. Silva et al. (1979)

A cobertura vegetal, originalmente constituida de matas tropicais, cedeu lugar a plantação de cana de açúcar e a pastagens geralmente naturais. Apesar da extensão da bacia, é possível sentir diferenças quanto à climatização entre os seus trechos superior, médio e inferior.

Do ponto de vista climático, a bacia do Imbê apresenta, no trecho superior um clima temperado brando chuvoso com verão fresco e nos trechos médio e inferior um clima temperado brando, com inverno seco e verão quente.

No que concerne a precipitação pluviométrica observa-se que os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, são os mais chuvosos e os de junho, julho e agosto os mais secos.

O período de observação é de setembro de 1976 até agosto de 1979.

A localização dos postos pluviométricos e do posto pluviométrico encontram-se na figura III.1.

### III.2 - Processo de Otimização e Calibração do Modelo

#### III.2.1 - Desenvolvimento

Com o objetivo de determinar os valores dos parâmetros do modelo, utilizou-se sub-rotinas de otimização desenvolvidas empiricamente por Liou (1970) através do método de tentativa e erro, baseando-se nos desvios entre vazões simuladas e registradas.

Este processo baseou-se em estudos de sensibilidade onde variou-se o valor de cada parâmetro de cada vez, mantendo-se os demais constantes. Cada parâmetro demonstrou ter seu próprio efeito no volume simulado e seu efeito variou com o tipo de vazão e com a época do ano.

Este estudo de sensibilidade ajudou a traduzir cada parâmetro da variável na equação para um termo com significado hidrológico proporcionando uma orientação muito útil no estabelecimento de regras para ajustar o valor de cada parâmetro.

As regras de ajustamento para 5 dos 6 parâmetros de volume são baseadas em observações da soma dos quadrados da relação normalizada entre a vazão mensal total registrada e a sintetizada determinada na sub-rotina SETFDI, durante os meses em que as vazões mensais sintetizadas são mais sensíveis a variações daquela variável.

Estes 5 parâmetros LZC, SUZC, ETLF, BUZC e SIAC, são determinados na sub-rotina SETFVP. Liou (1970) verificou que para um melhor ajustamento do parâmetro BMIR a indexação das observações das diferenças entre a vazão básica registrada e simulada proporciona melhores resultados ( sub-rotina

SETBMI ). No entanto, no processo da estimativa dos parâmetros de volume de escoamento, estas duas sub-rotinas funcionam como uma única para o ajuste simultâneo dos 6 parâmetros.

É claro que um ajuste exato é impossível devido ao modelo não conseguir refletir toda a complexidade do processo hidrológico e também devido a problemas geralmente encontrados nos dados de entrada onde, muitas vezes, não reproduzem fielmente o que ocorreu na realidade.

A partir daí foram feitos ajustes convenientes nestas sub-rotinas de otimização, onde estes estudos deixaram claramente definido a época do ano, o tipo de vazão, etc em que cada parâmetro deveria ser otimizado.

### III.2.2 - Estudo de Sensibilidade e Otimização dos Parâmetros

#### III.2.2.1 - Ajustamento de LZC

O parâmetro LZC indica a capacidade do solo armazenar umidade. Quanto maior seu valor, mais água pode ser armazenada no solo. Isto direta ou indiretamente controla as taxas de infiltração, evapotranspiração e percolação para a água subterrânea.

Os estudos de sensibilidade demonstram que aumentando-se o valor de LZC:

- O escoamento superficial se reduz. Nos meses secos onde a precipitação é menos apta a saturar a capacidade disponível de armazenamento do solo, essa redução é maior.
- O escoamento superficial diminui abruptamente em todos os meses verdadeiramente secos depois de uma estação longa de seca, isto se deve a maior infiltração de água e ao seu armazenamento.

A consistência com que o escoamento superficial diminui com o aumento de LZC, não só verificado por Liou, mas também para a bacia do Rio Imbê, sugere que o ajustamento de LZC seja tentado com o escoamento superficial.

Foi então utilizada a vazão total nos meses onde o escoamento superficial é conhecidamente predominante. Um mês de escoamento superficial é definido como sendo um mês no qual mais da metade do escoamento total seja escoamento superficial.

Se existirem pelo menos 3 meses de escoamento superficial durante o ano hidrológico, são seguidos os seguintes passos para se ajustar LZC:

- Somam-se os quadrados da relação normalizada entre a vazão mensal total registrada e a sintetizada (SOFMD) para o número de meses de escoamento superficial (FNOFM).
- Calcula-se a constante de ajustamento FLZC para LZC de acordo com a equação III.1

$$FLZC = \frac{SOFMD}{0,75 \times FNOFM} \quad (III.1)$$

- Se  $FLZC > 0$  significa que a vazão sintetizada é maior que a vazão registrada, aumenta-se LZC multiplicando-se por  $(1 + FLZC)$ , assim a vazão sintetizada diminui.
- Se  $FLZC < 0$  significa que a vazão sintetizada é menor que a vazão registrada, diminui-se LZC dividindo-se pelo fator  $(1 - FLZC)$ , assim a vazão sintetizada aumenta.

O fator 0,75 usado no cálculo de FLZC e os demais fatores usados nos cálculos dos outros parâmetros, 1,0 para SUZC, 1,2 para ETLF, 0,4 para BUZC e 1,5 para SIAC foram

estabelecidos por Liou empiricamente por processos de tentativas para que o parâmetro chegasse a um valor ótimo.

Este mesmo processo foi tentado para a bacia do Rio Imbé, onde estas mesmas constantes demonstraram funcionar satisfatoriamente, sem que nenhuma alteração nos seus valores se fizesse necessário.

Se existirem menos de 3 meses de escoamento superficial durante o ano hidrológico o ajustamento é feito tomando-se a média dos índices dos desvios das vazões mensais dos dois maiores runoffs mensais como fator de ajustamento de acordo com a equação III.2

$$FLZC = MFDP(MIR) + MFDP(M2R) / 2 \quad (III.2)$$

onde:

MIR e M2R são os meses com maiores runoffs

MFDP é o desvio da vazão naqueles meses

A partir daí LZC é ajustado de acordo com as equações III.3 e III.4

Se  $FLZC > 0$

$$LZC = (FLZC + 1,0) \times LZC \quad (III.3)$$

Se  $FLZC < 0$

$$LZC = LZC / (1 - FLZC) \quad (III.4)$$

Para a bacia do Rio Imbé a otimização deste parâmetro LZC caiu neste segundo caso, pois não existiram 3 meses de escoamento superficial, ficando a otimização deste parâmetro para os meses de outubro e novembro para o ano 1976/1977, novembro e dezembro para 1977/1978 e fevereiro e março para 1978/1979.

Um processo alternativo é chamado quando depois de 6 ajustamentos grosseiros LZC exceder a 734 mm, neste caso a sub-rotina SETFVP não é utilizada.

Este processo alternativo é baseado no volume de runoff anual de acordo com a equação III.5

$$LZC = PLZC \left( \frac{SATFV}{RATFV} \right) \quad (III.5)$$

onde:

PLZC é o valor anterior de LZC

SATFV é o volume total da vazão anual sintetizada

RATFV é o volume total da vazão anual registrada

Um caso especial no ajustamento de LZC acontece quando existem problemas causados pela dificuldade em se estabelecer condições de umidade inicial. Se o ajustamento está no ciclo de ajustamento grosseiro e o valor ajustado de LZC é menor do que LZS (condição associada a umidade inicial) somada de 2,0, o valor de LZC é tomado igual a LZS + 2,0. Este passo foi desenvolvido para eliminar um desajuste do modelo causado por iniciar o ano hidrológico com a bacia saturada.

Como se pode verificar nas tabelas III.1, III.2 e III.3 que fornecem os ciclos do processo de otimização para os 3 anos de calibração respectivamente, o ajustamento alternativo não foi utilizado visto os valores de LZC estarem bem abaixo de 734 mm.

No ciclo de ajustamento grosseiro os valores de LZC são limitados entre 762mm e 50,8mm, no ajustamento

fino esta limitação é retirada devido a um razoável grupo de valores de parâmetros ter sido estimado no ciclo grosseiro. Se o ajustamento fora deste intervalo pode melhorar o processo de otimização como um todo, o valor ajustado deve ser aceito para LZC. Se durante o ciclo de ajustamento grosseiro o volume total da vazão anual for chamado para ajustar LZC, então a equação III.5 é mantida no ciclo de ajustamento fino.

As tabelas III.1, III.2 e III.3, também fornecem a soma dos quadrados dos desvios das vazões mensais (SSQM) e o nível de confiança da otimização. O cálculo do nível de confiança (R), equação III.6, foi adicionado ao modelo para verificar a sua efetividade. É baseado na relação da diferença entre a variância das vazões registradas ( $FO^2$ ) equação III.7 e a soma dos quadrados dos desvios das vazões mensais (SSQM) pela variância ( $FO^2$ ).

$$R = \frac{FO^2 - SSQM}{FO^2} \quad (III.6)$$

$$FO^2 = \sum_{j=1}^n (Q_j^* - \bar{Q}^*)^2 \quad (III.7)$$

onde:

$Q_j^*$  é a vazão registrada em um dado mês

$\bar{Q}^*$  é a vazão média registrada no ano hidrológico

#### III.2.2.2 - Ajustamento de SUZC

O parâmetro SUZC mede a capacidade de armazenamento sazonal da zona superior do solo. O estudo de sensibilidade mostra que aumentando-se o valor de SUZC, o runoff total durante o período de seca reduz-se particularmente para

os meses que tenham registrado alguma precipitação e reduz o escoamento básico de uma quantidade que se torna progressivamente grande através deste período.

Se a superfície da bacia é capaz de armazenar umidade, as chuvas do período de seca são facilmente absorvidas na superfície, reduzindo o runoff de grandes precipitações e eliminando o de pequenas. A água ficará na superfície do solo até evaporar-se, a infiltração diminuirá e a água subterrânea será drenada gradualmente.

O ajustamento de SUZC é baseado no "índice" dos desvios das vazões mensais durante o período de 1 de abril a 31 de agosto, que é caracterizado como período de seca, com os meses que registrarem maiores precipitações, somada aos índices de abril e maio onde mais da metade da vazão sintetizada foi escoamento básico.

O ajustamento é executado da seguinte maneira.

- Determina-se os dois meses no período de 1º de abril a 1º de agosto com maior precipitação registrada.
- Verifica-se a vazão sintetizada de abril e maio para determinar se o escoamento básico é mais da metade do total

Soma-se os índices dos desvios das vazões mensais dos dois meses de seca com maior índice pluviométrico de acordo com a equação III.8

$$FSUZC = MFDP(MISP) + MFDP(M2SP) \quad (III.8)$$

onde MISP e M2SP são os dois meses com maior índice de precipitação dentro do período de seca.



- Se os meses de abril e maio são de escoamento básico, soma-se o valor encontrado na equação III.8, obtendo-se um novo valor para FSUZC.
- Se FSUZC exceder a 1,0, iguala-se a 1,0, se for menor que -1,0 iguala-se a -1,0.
- Se FSUZC for positivo, aumenta-se SUZC multiplicando por  $(1+FSUZC)$  para diminuir a vazão do mes indexado. Se FSUZC for negativo, diminui-se SUZC dividindo-se por  $(1-FSUZC)$ , para aumentar a vazão do mes indexado.

O valor de SUZC é limitado entre 0,3 e 3,0 durante o ciclo de ajustamento grosseiro e retirado no ciclo de ajustamento fino.

#### III.2.2.3 - Ajustamento de ETLF

ETLF estima o volume de evapotranspiração da zona inferior do solo.

Grandes valores de ETLF devem reduzir o escoamento das chuvas do período de seca, de uma quantidade que progressivamente aumenta através da estação, até o reabastecimento da umidade.

O estudo de sensibilidade mostra que quando ETLF aumenta, as vazões diminuem através do ano, mas a maior diminuição é verificada no período de seca. A diminuição das vazões torna-se progressivamente severa, até a primeira maior chuva durante os meses onde a maior parte da vazão é da umidade previamente armazenada dentro da bacia.

O ajustamento de ETLF é baseado na comparação das vazões no período de seca, quando a precipitação excede

50,8 mm, que foi estipulada arbitrariamente por Liou (1970) e mantida para a bacia em estudo.

MBWS é determinado como o início do período de chuvas e MBDS como o início do período de seca.

Se existir pelo menos um mês no período começando com MBDS e um mês terminando com MBWS e tendo acima de 50,8 de precipitação, ETLF é ajustado como segue:

- Soma-se os índices das vazões mensais dos meses com maior índice de precipitação no período de seca (WSM), para se obter (SWSMD)
- Calcula-se o fator de ajustamento FETLF pela equação III.9

$$FETLF = 1,2 \times (SWSMD/WSM) \quad (III.9)$$

onde WSM é o número de meses de seca.

- Se FETLF exceder a 1,0, é igualado a 1,0, se for menor que -1,0 é igualado a -1,0.
- Se FETLF for positivo, significa que a vazão sintetizada naqueles meses é muito alta, aumenta-se ETLF multiplicando-o por (1+FETLF)
- Se FETLF for negativo, diminui-se o valor de ETLF dividindo-o por (1-FETLF) de maneira a aumentar a vazão naqueles meses.

Caso o período seja tão seco que nenhum mes tenha 50,8 de precipitação, um outro processo alternativo é adotado, usando-se o índice do desvio das vazões para os meses com maior volume de escoamento de acordo com a equação III.10

$$FETLF = 5,0 \times MFDP(MlR) \quad (III.10)$$

onde MFDP(MlR) é o índice do desvio da vazão para o mes com o maior volume de escoamento.

Este processo alternativo não foi utilizado para a bacia do Rio Imbé, visto que todos os 3 anos utilizados no processo de calibração, no período correspondente possuirem pelo menos um mês com precipitações acima de 50,8 mm.

No ciclo de ajustamento grosseiro o valor de ETLF é fixado entre 0,05 e 0,60

Verifica-se que os valores encontrados pelo modelo para bacia do Rio Imbé, tabela III.4, em comparação com os da tabela II.1 são bem menores.

Segundo Liou (1970) que também encontrou valores um tanto diversos destes sugeridos na tabela II.1, não existe nenhuma maneira, neste ponto, para saber o quanto isto é causado pela aleatoriedade da dispersão da estimativa.

Ano Hidrológico	ETLF
1976 - 1977	0,0942
1977 - 1978	0,0858
1978 - 1979	0,0609

Tabela III. 4 - Valores de ETLF para  
bacia do Rio Imbé

#### III.2.2.4 - Ajustamento de BUZC

BUZC é um fator básico que estima a capacidade de armazenamento de umidade na zona superior do solo.

Está relacionado à capacidade do solo de reter umidade nos reservatórios de interceptação ou depressão. Os estudos de sensibilidade demonstram que aumentando-se BUZC, a vazão simulada diminui ligeiramente para todos os meses, mas a maior diminuição é notada durante o período de seca com a maior diminuição vindo nos meses de abril, maio e junho onde, neste período, a umidade foi verificada ser maior do que nos outros meses de seca.

O ajustamento de BUZC segue os seguintes passos:

- Calcula-se o fator de ajustamento de acordo com a equação III.11

$$FBUZC = 0,4 \times (MFDP(i) + MFDP(j) + MFDP(k)) \quad (III.11)$$

onde  $MFDP(i) + MFDP(j) + MFDP(k)$  é a soma dos desvios das vazões mensais para os meses acima descritos.

- Se FBUZC exceder a 1,0, iguala-se a 1,0, se for menor que -1,0 iguala-se a -1,0.
- Ajusta-se BUZC multiplicando-o pelo fator  $(1+FBUZC)$ , se FBUZC for positivo, para diminuir a vazão do mes indexado e se FBUZC for negativo, divide-o por  $(1-FBUZC)$  para aumentar a vazão do mes indexado.

No ciclo de ajustamento grosseiro BUZC é limitado entre 0,2 e 4,0. Se depois de 6 ciclos grosseiros o valor exceder a 3,9, significa que os 3 meses abril, maio e junho não proporcionam um ajustamento conveniente. Três outros meses julho, agosto e setembro que são os 3 outros meses de seca, são substituídos no primeiro passo para os ciclos grosseiros restantes e para todo ciclo fino.

De acordo com as tabelas III.1, III.2 e III.3 esta substituição não foi verificada para os 3 anos utilizados na calibração.

#### III.2.2.5 - Ajustamento de SIAC

SIAC é a constante de ajustamento da taxa de infiltração sazonal. Relaciona taxas de infiltração com a evaporação antecedente para levar em conta a infiltração mais rápida durante períodos quentes.

O estudo de sensibilidade mostrou que quando SIAC aumenta, as vazões em meses de inverno, que são os meses de seca onde geralmente a evapotranspiração é menor do que a precipitação, aumentam e diminuem em meses de verão ou meses molhados onde a evapotranspiração geralmente é bem grande em relação a precipitação.

O ajustamento de SIAC usa os índices dos desvios das vazões em ambos os meses de seca e molhados. Se o valor anterior de SIAC exceder a 1,0, o ajustamento é baseado somente em meses de seca. O estudo de sensibilidade demonstra que a maioria das vazões em meses molhados são pouco sensíveis a esta taxa de variação. Os meses de seca particularmente usados são os 3 primeiros meses quando a precipitação é maior que a evapotranspiração. O ajustamento segue os seguintes passos:

- Calcula-se a média dos índices dos desvios mensais destes 3 meses para se obter os índices dos desvios das vazões do período de seca (SFDX) pela equação III.12

$$SFDX = \frac{MFDP(MBDS) + MFDP(MBDS+1) + MFDP(MBDS+2)}{3} \quad (III.12)$$

onde MBDS é o começo da estação seca definido anteriormente.

- Calcula-se o fator de ajustamento de acordo com a equação III.13

$$FSIAC = 1,5 \times SFDX \quad (III.13)$$

- Confina-se o valor de SIAC entre -1,0 e 1,0
- Se FSIAC for positivo, aumenta-se SIAC multiplicando-o por  $(1+FSIAC)$  para diminuir a vazão sintetizada nestes meses. Se FSIAC é negativo diminui-se SIAC dividindo-o por  $(1 - FSIAC)$  para aumentar a vazão sintetizada.

Quando o valor de SIAC é menor do que 1,0, as vazões do período molhado como as do período seco são sensíveis a estas mudanças de valores e a regra de ajustamento é modificada para incluir meses do período molhado. Primeiro o índice do desvio da vazão do período molhado (WFDX) é tomado como a média dos desvios dos 3 primeiros meses onde a precipitação excede a evapotranspiração potencial de acordo com a equação III.14

$$WFDX = \frac{MFDP(MBWS) + MFDP(MBWS+1) + MFDP(MBWS+2)}{3} \quad (III.14)$$

onde MBWS é o começo da estação molhada definida anteriormente.

Se o valor de SIAC estiver entre 0,6 e 1,0 WFDX é calculado de acordo com a equação III.15

$$WFDX = \frac{WFDX \times (1-SIAC)}{0,40} \quad (III.15)$$

Os valores de SIAC mudam as vazões simuladas em direção oposta ao período molhado em relação ao período de seca, daí o fator de ajustamento FSIAC é calculado de acordo com a equação III.16.

$$\text{FSIAC} = 1,5 \times (\text{SFDX} - \text{WFDX}) \quad (\text{III.16})$$

Para a bacia do Rio Imb  o ajustamento de SIAC foi estabelecido nos dois períodos, como se pode notar nas tabelas III.1, III.2 e III.3. Os seus valores para os 3 anos de otimização estão abaixo de 1,0.

No ciclo de ajustamento grosseiro, se SIAC é ajustado para um valor menor que 0,02 é tomado igual a 0,02, se o valor do ajustamento for maior que 4,0, é tomado igual a 0,02. A explicação é que se SIAC for menor que 0,02, a infiltração não varia por estação. No entanto, o valor volta outra vez para 0,02 antes de cada ajustamento subsequente para que seja possível que os multiplicadores de ajustamento aumentem de valor se a vazão assim indicar.

#### III.2.2.6 - Ajustamento de BMIR

BMIR é o parâmetro dentro do modelo que controla a taxa de infiltração de umidade dentro do solo. Como um  ndice básico de infiltração de umidade dentro do solo, BMIR controla o volume e o escoamento sintetizado durante pancadas de chuva, controlando a recarga da bacia, o volume do escoamento básico e a percolação para água subterrânea.

No estudo de sensibilidade, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e variando-se BMIR, verifica-se, que determinadas vazões sintetizadas variam significativamente com as variações de BMIR, enquanto outras permanecem insensíveis.

A proximidade da variação do parâmetro BMIR com o escoamento básico, também verificada para a bacia do Rio Imb , sugere que BMIR seja ajustado com a vazão básica registrada.

Uma vez que o escoamento básico não é distinguido dentro da vazão total, uma técnica para separação da hidrografa é empregada dentro do modelo. A técnica empregada chama a sub-rotina SETRBF para estimar através do método dos mínimos quadrados a linha de recessão do escoamento básico fornecendo assim a vazão total básica diária. A vazão básica é estimada para os 3 primeiros dias que se seguem a vazão de pico em cada sequência de recessão selecionada pela sub-rotina RECESS.

O processo utilizado para estimar BMIR é basicamente o mesmo daquele usado para estimar os outros 5 parâmetros de volume.

O ajustamento de BMIR é feito em sub-rotinas separadas devido seu ajustamento ser indexado a uma informação de vazão diferente.

A relação entre o escoamento básico registrado e o sintetizado é encontrado dividindo-se cada escoamento básico sintetizado pelo registrado correspondente e fixando-se esta relação para um valor máximo de 3,0. Este valor máximo é fixado para amortecer os erros causados por sequências com problemas de dados. A média dos resultados é calculada. Uma média maior do que 1,0 indica que BMIR necessita ser reduzido para diminuir a vazão básica sintetizada. Uma média menor que 1,0 sugere um aumento em BMIR.

De acordo com Liou, em alguns casos o método acima descrito para ajustar BMIR, usando um índice estimado do escoamento básico não funciona bem. Por exemplo, podem existir casos com poucas sequências de recessão bem definidas geralmente devido a temporais onde a precipitação registrada é signifi



cativamente menor do que realmente ocorreu. A vazão básica simulada pode então ser bem menor do que os valores registrados, tornando BMIR tão grande que toda vazão simulada torna-se escoamento básico desaparecendo a verdadeira hidrógrafa. O programa é manuseado para desenvolver um ajustamento alternativo para ser usado quando o primeiro não funciona propriamente.

A mudança de regra para ajustar BMIR vem quando BMIR exceder o valor de 508 mm depois de 5 ajustamentos grosseiros. Como 508 mm é um valor razoavelmente grande, o ajustamento alternativo é reduzir BMIR em sequências de 10% de redução, esta alternativa é realizada no programa principal.

Esta mudança de regra foi verificada para os 3 anos de calibração da bacia do Rio Imbé conforme mostram as tabelas III.1, III.2 e III.3.

No ciclo de ajustamento fino esta limitação é retirada, porque se o valor ajustado fora deste intervalo pode melhorar o processo de otimização como um todo, o valor ajustado deve ser aceito.

#### III.2.2.7 - Ajustamento de BIVF

BIVF é o fator básico de escoamento sub-superficial que controla a divisão da umidade que não infiltra no solo entre escoamento sub-superficial e o escoamento direto e assim indiretamente governa o tempo de distribuição da hidrógrafa de cheia.

BIVF é um parâmetro intermediário entre os 6 parâmetros de volume e os 4 parâmetros de propagação de onda. BIVF não pode ser estimado durante o ajustamento inicial (ciclo grosseiro) dos 6 parâmetros de volume porque o volume do escoamento sub-superficial depende dos outros parâmetros e seus valo

res são ajustados em incrementos grandes para BIVF se estabilizar razoavelmente. BIVF é estimado na fase de ajustamento fino dos 6 parâmetros de volume na sub-rotina SETBIV.

O número de ajustamentos finos requeridos para determinar se o melhor grupo de parâmetros de volume foi estimado é suficiente para que o ajustamento de BIVF convirja para um valor aceitável. Assim sendo o valor de BIVF é tomado como o valor final e não está associado ao menor valor de SSQM.

O ajustamento de BIVF é baseado na comparação entre escoamento sub-superficial registrado e sintetizado durante os 3 primeiros dias de cada sequência de recessão selecionada na sub-rotina RECESS.

O escoamento sub-superficial registrado no começo da recessão é determinado pela sub-rotina SETRBF, e o segundo e terceiro dia de escoamento sub-superficial são determinados multiplicando-se o primeiro dia de escoamento sub-superficial pela constante de recessão do escoamento sub-superficial (IFRC) uma e duas vezes respectivamente.

A taxa entre o escoamento sub-superficial sintetizado ajustado e o registrado para cada um dos 3 primeiros dias é usada para ajustar BIVF. Devido a um escoamento sub-superficial muito pequeno causar um fator de ajustamento razoavelmente grande, a taxa para cada dia é limitada a um valor máximo de 3,0. O escoamento sub-superficial não foi simulado para os anos de 1976-1977 e 1978-1979 devido a bacia apresentar-se muito seca.

CICLOS				PARÂMETROS	LZC (mm)	BMIR (mm/hr)	SUZC	ETLF	BUZC	SIAC	BIVF	UMIDADE INI CIAL ARMAZE NADA (LZS)	SSQM	NÍVEL DE CONFIANÇA
TRIP 1	CICLO DE AJUSTAMENTO	GROSSEIRO	VALOR INICIAL	101,6000	406,4000	0,6000	0,1500	0,8000	0,9000	0,0000	50,8000	104,149	0,4410	
			1	73,3781	900,4148	0,3000	0,0942	0,4547	0,4500	0,0000	33,5051	27,780	0,8509	
			2	63,7642	1267,8740	0,3000	0,1038	0,3940	0,2901	0,0000	37,3126	42,331	0,7728	
			3	57,0154	1736,6615	0,3000	0,1137	0,3427	0,1763	0,0000	27,8486	59,207	0,6822	
			4	51,3918	2355,7890	0,3000	0,1189	0,2981	0,1027	0,0000	21,1226	69,958	0,6245	
			5	50,8000	508,0000	0,3000	0,1218	0,2620	0,0583	0,0000	18,5623	81,695	0,5615	
			6	50,8000	457,2000	0,3000	0,1241	0,2101	0,0292	0,0000	16,8529	82,618	0,5566	
			7	50,8000	411,4800	0,3000	0,1256	0,2000	0,0000	0,0000	16,4973	83,677	0,5509	
			8	50,8000	370,3320	0,3000	0,1271	0,2000	0,0000	0,0000	16,1722	84,862	0,5445	
			9	50,8000	333,2988	0,3000	0,1286	0,2000	0,0000	0,0000	15,8267	86,121	0,5378	
		10	50,8000	299,9689	0,3000	0,1303	0,2000	0,0000	0,0000	15,4813	87,520	0,5303		
		FINO	11	73,3781	900,4148	0,3000	0,0942	0,4547	0,4500	0,0000	33,5051	27,780	0,8509	
	12		63,7870	508,0000	0,3285	0,1079	0,4022	0,3084	0,0000	37,1932	65,251	0,6498		
VALORES FINAIS CALIBRADOS				73,3781	900,4148	0,3000	0,0942	0,4547	0,4500	0,0000	33,5051	27,780	0,8509	

TABELA III.1 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS ANO 1976-1977

CICLOS				PARÂMETROS	LZC (mm)	BMIR (mm/hr)	SUZC	ETLF	BUZC	SIAC	BIVF	UMIDADE INI CIAL ARMAZE NADA (LZS)	SSQM	NÍVEL DE CONFIANÇA
TRIP 1	CICLO DE AJUSTAMENTO	GROSSEIRO	VALOR INICIAL	101,6000	406,4000	0,6000	0,1500	0,8000	0,9000	0,0000	50,8000	20,814	0,5084	
			1	63,7591	775,1140	0,3000	0,0750	0,4000	0,4500	0,6000	46,5582	2,985	0,9295	
			2	50,8000	807,5016	0,3000	0,0522	0,2102	0,2537	0,6000	45,3390	2,312	0,9454	
			3	50,8000	767,7226	0,3000	0,1044	0,2000	0,1454	0,6000	51,4248	4,420	0,8956	
			4	50,8000	764,9134	0,3000	0,0674	0,2000	0,0727	0,6000	32,1386	2,792	0,9341	
			5	50,8000	508,0000	0,3000	0,0500	0,2000	0,0404	0,6000	44,3611	2,425	0,9427	
			6	50,8000	457,2000	0,3000	0,1000	0,2000	0,0220	0,6000	51,6280	4,609	0,8911	
			7	50,8000	411,4800	0,3000	0,0660	0,2000	0,0000	0,6000	32,5501	3,135	0,9260	
			8	50,8000	370,3320	0,3000	0,0500	0,2000	0,0000	0,6000	43,6448	2,667	0,9370	
			9	50,8000	333,2988	0,3000	0,0500	0,2000	0,0000	0,6000	50,7848	2,779	0,9344	
		10	50,8000	299,9685	0,3000	0,0500	0,2000	0,0000	0,6000	50,4774	2,919	0,9311		
		FINO	11	50,8000	807,5016	0,3000	0,0522	0,2102	0,2537	0,6000	45,3390	1,294	0,9694	
			12	40,1828	508,0000	0,1500	0,1044	0,1389	0,1765	0,6092	40,2514	1,230	0,9709	
			13	33,6906	457,2000	0,0750	0,0936	0,0951	0,1247	0,6236	17,4955	1,051	0,9752	
			14	29,0195	411,4800	0,0396	0,0858	0,0697	0,0915	0,6233	14,6634	1,047	0,9753	
	15		25,4991	370,3320	0,0228	0,0824	0,0531	0,0666	0,6072	12,4358	1,143	0,9730		
VALORES FINAIS CALIBRADOS				29,0195	411,4800	0,0396	0,0858	0,0697	0,0915	0,5917	14,6634	1,047	0,9753	

TABELA III.2 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS - ANO: 1977-1978

CICLOS				PARÂMETROS	LZC (mm)	BMIR (mm/hr)	SUZC	ETLF	BUZC	SIAC	BIVF	UMIDADE INI CIAL ARMAZE NADA (LZS)	SSQM	NÍVEL DE CONFIANÇA
TRIP 1	CICLO DE AJUSTAMENTO	GROSSEIRO	VALOR INICIAL		101,6000	406,4000	0,6000	0,1500	0,8000	0,9000	0,0000	50,8000	7,341	0,7941
			1		84,9757	701,7944	0,3000	0,0750	0,4067	0,4500	0,0000	62,1563	0,918	0,9743
			2		80,0862	812,6806	0,3000	0,0609	0,3012	0,2561	0,0000	78,5927	0,902	0,9747
			3		76,1416	859,1804	0,3000	0,1219	0,2298	0,1429	0,0000	81,8642	2,016	0,9435
			4		71,4705	965,5734	0,3000	0,0944	0,2000	0,0720	0,0000	49,7967	1,456	0,9592
			5		67,5970	508,0000	0,3000	0,0714	0,2000	0,0385	0,0000	54,6252	1,097	0,9692
			6		64,2925	457,2000	0,3000	0,0600	0,2000	0,0200	0,0000	59,8500	1,068	0,9700
			7		61,4299	411,4800	0,3000	0,1200	0,2000	0,0000	0,0000	61,7042	2,477	0,9305
			8		57,7012	370,3320	0,3000	0,0898	0,2000	0,0000	0,0000	36,3144	1,708	0,9521
			9		54,5541	333,2988	0,3000	0,0677	0,2000	0,0000	0,0000	41,4706	1,373	0,9615
			10		51,8312	299,9689	0,3000	0,0571	0,2000	0,0000	0,0000	45,9232	1,410	0,9605
			11		80,0862	812,6806	0,3000	0,0609	0,3012	0,2561	0,0000	78,5927	0,847	0,9762
	FINO		12		76,3549	508,000	0,1775	0,1219	0,2429	0,1471	0,0000	81,3613	1,914	0,9463
VALORES FINAIS CALIBRADOS					80,0862	812,6806	0,3000	0,0609	0,3012	0,2561	0,0000	78,5927	0,847	0,9762

TABELA III.3 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS - ANO: 1978-1979

### III.2.3 - Parâmetros de Propagação de Onda no Canal

Para cada ano hidrológico e para cada um dos 5 picos de cheia da hidrógrafa verificada nos dados de entrada, a hora e o tamanho do pico são lidos. A sub-rotina STRHRS é chamada para determinar a hora do início e do fim do runoff que contribui para cheia registrada e toda vazão de entrada no canal sintetizada entre estes dois tempos é arquivada na passagem pela TRIP 2, através do programa principal. A sub-rotina ADJHYD é então chamada para ajustar o tamanho de cada vazão sintetizada entrando no canal, tornando o volume da vazão sintetizada igual ao volume da registrada. Daí a sub-rotina SETHRP é chamada para estimar os dois parâmetros de propagação NCTRI e SRX para cada hidrógrafa de cheia especificada na entrada de dados.

A sub-rotina SETHRP procura a combinação dos valores de NCTRI e SRX, que produzem uma hidrógrafa sintetizada com o pico de cheia mais próximo do pico registrado em tamanho e no tempo, ou seja, procura soluções aproximadas em um pré-determinado grupo de valores razoáveis e rejeita dados quando não consegue encontrar uma solução.

A partir da sub-rotina SETHRP a sub-rotina FIXTRI é chamada para rearrumar o histograma tempo-área, isto é, estabelece valores da fração do incremento de tempo de propagação, utilizado no cálculo de NCTRI. A partir daí as sub-rotinas TIMERT e STORRT realizam as repetidas tentativas do tempo e do armazenamento de propagação da vazão de entrada no canal, as quais são necessárias na pesquisa dos valores dos parâmetros de propagação.

Se o maior pico de cheia da hidrógrafa sinte

tizada para uma dada precipitação é menor do que metade do pico registrado, o grupo de valores de NCTRI e SRX são rejeitados e aquela precipitação é excluída da estimativa dos parâmetros como mostra a tabela III.5 para o ano de 1976-1977.

O valor médio de NCTRI para uma dada estação do ano é tomado como a média das precipitações intensas, ponderada pelas vazões de pico da hidrógrafa registrada, porque uma hidrógrafa de cheia grande fornece uma estimativa melhor de NCTRI. A sub-rotina então chama a sub-rotina SETSRP para estimar CSRX e FSRX.

Na sub-rotina SETSRP é feito um teste para saber se SRX deve ser usado como a média dos valores das cheias ou se dois valores devem ser usados, CSRX quando a vazão está confinada dentro do canal e FSRX quando a vazão entra na planície de inundação.

O teste usado foi confrontar os valores encontrados de SRX, com os picos das vazões registradas. Se SRX aumenta com os picos de cheia, CSRX e FSRX devem ser calculados de acordo com a análise qualitativa das condições físicas da bacia, caso contrário os valores encontrados para SRX podem ser tomados como uma média para um simples valor geral das condições da bacia e CSRX é igual a FSRX, que foi o que ocorreu com a bacia em estudo como mostra a tabela III.5.

Um aumento de SRX com o pico da vazão sugere um amortecimento na planície de inundação. Em outras palavras para hidrógrafas pequenas as vazões são confinadas dentro do canal principal, o amortecimento da hidrógrafa é limitado e o resultado é um valor baixo de SRX. Ao contrário grandes cheias

extravasam o canal. Quanto maior a planície de inundação mais drasticamente os picos de cheia são amortecidos, e o valor de SRX é alto.

Sendo assim o modelo seleciona os valores para serem usados de SRX em um determinado tempo de acordo com o tamanho da vazão sintetizada para os períodos de propagação antecedente como mostra a figura III.5. CHCAP é usado para indexar a vazão com a planície de inundação, quando contrastada com o armazenamento natural do canal, tornando-se de influência predominante no reservatório de propagação.

Quando a vazão sintetizada é menor do que metade de CHCAP, CSRX é usado para propagação. Se a vazão sintetizada excede duas vezes CHCAP, FSRX é usado. Quando a vazão sintetizada está entre esses dois valores SRX é interpolado como mostra a curva da figura III.5.

CSRX é calculado de acordo com a equação III.17 (figura III.5).

$$CSRX = a + b(CHCAP/2) \quad (III.17)$$



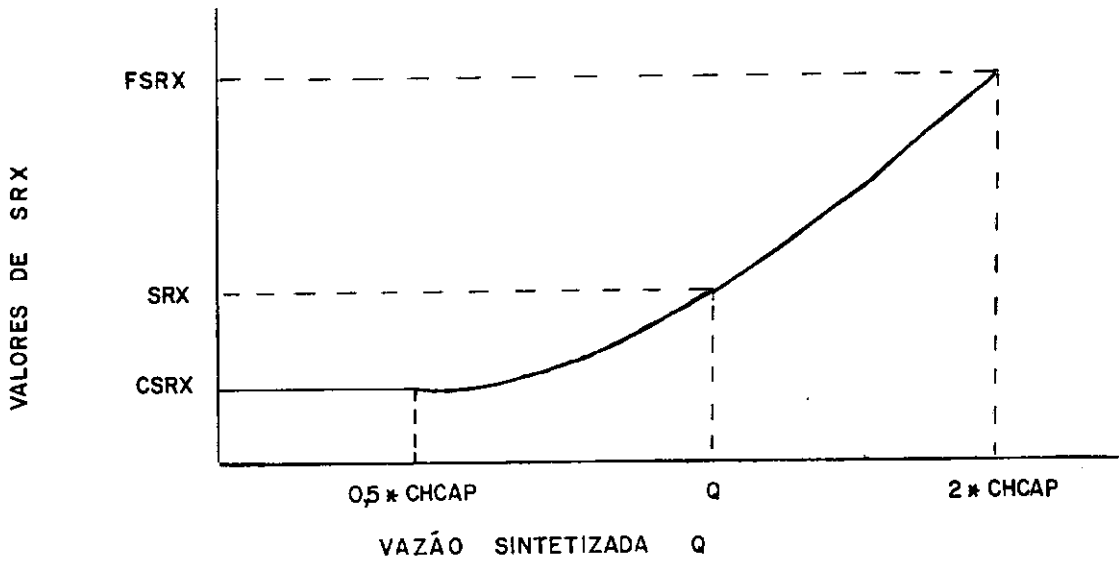


FIGURA III-5 RELAÇÃO ENTRE SRX E A VAZÃO SINTETIZADA

Se CSRX for menor que 0,8, é tomado igual a 0,8 para impedir a seleção de valores fisicamente irracionais causados por hidrógrafas quase iguais às vazões de pico as quais possuem grandes diferenças na estimativa de SRX.

Para picos de cheia com vazões menores que a metade de CHCAP, CSRX é usado para todo o reservatório de propagação através da hidrógrafa. Para precipitações intensas, SRX é variado com a vazão de acordo com a curva da figura III.5. FSRX não pode ser estimado substituindo-se  $\text{CHCAP}/2$  por  $2 \times \text{CHCAP}$  na equação III.17 porque os dados foram derivados propagando-se toda a hidrógrafa com valores de SRX fixos. O valor de FSRX é ajustado entre os valores de CSRX e 0,99 que é usado como limite superior para minimizar os efeitos dos erros de arredondamento nos volumes de cheias.

O cálculo de FSRX é baseado no critério da minimização dos quadrados das diferenças entre os picos das hi

drôgrafas registrada e sintetizada.

A tabela III.5 fornece a calibração dos parâmetros de propagação.

HIDRÓGRAFA	ANO	1976 - 1977				1977 - 1978				1978 - 1979			
		VALOR DE TESTE		VALOR DE TESTE ES COLHIDO		VALOR DE TESTE		VALOR DE TESTE ES COLHIDO		VALOR DE TESTE		VALOR DE TESTE ES COLHIDO	
		NCTRI	SRX	NCTRI	SRX	NCTRI	SRX	NCTRI	SRX	NCTRI	SRX	NCTRI	SRX
CHEIA 1				REJEITADA		5	0,995			5	0,995		
					5	0,990			5	0,990			
					5	0,985			5	0,985			
					5	0,980			5	0,980			
					5	0,960							
					5	0,930							
					16	0,930							
					16	0,900	16	0,900			5	0,980	
CHEIA 2				REJEITADA		5	0,995			5	0,995		
					5	0,990			5	0,990			
					5	0,985			5	0,985			
					5	0,980			5	0,980			
					5	0,960			5	0,960			
					5	0,930			5	0,930			
					5	0,900			5	0,900			
							5	0,900			5	0,900	
CHEIA 3	5	0,995			5	0,995			5	0,995			
	5	0,990			5	0,990			5	0,990			
	5	0,985			5	0,985			5	0,985			
	5	0,980			5	0,980			12	0,985			
	5	0,960			5	0,960			16	0,985			
	5	0,930			17	0,960			18	0,985			
	5	0,900			20	0,930			19	0,985			
					20	0,900			19	0,980			
									20	0,980			
								20	0,960				
			5	0,930			20	0,900	20	0,930	20	0,960	
CHEIA 4	5	0,995			5	0,995			5	0,995			
	10	0,995			5	0,990			5	0,990			
	11	0,995							5	0,985			
	11	0,990							5	0,980			
				11	0,995			5	0,995			5	0,985
CHEIA 5	5	0,995			5	0,995			5	0,995			
	5	0,990			5	0,990			5	0,990			
					5	0,985			5	0,985			
					5	0,980			5	0,980			
					5	0,960			5	0,960			
					17	0,960			18	0,960			
					20	0,930			18	0,930			
					20	0,900	20	0,900	18	0,900	18	0,900	
				5	0,995								
PARÂMETROS OTIMIZADOS CSRX FSRX	0,9698				0,9180				0,9449				
	0,9698				0,9180				0,9449				
VALOR ÓTIMO NCTRI		7				13				11			

TABELA III.5 - CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO

### III.2.4 - Ajuste da Sub-rotina PRECHK

Como já foi dito anteriormente um dos problemas na imprecisão do processo de simulação deve-se a problemas nos dados de entrada, que algumas vezes não reproduzem fielmente o que ocorreu na realidade ou ainda quando a estação pluviométrica encontra-se fora da bacia e também quando tenta-se representar uma bacia muito grande com poucas estações pluviométricas.

A sub-rotina PRECHK tenta ajustar essas anomalias ajustando os dados de precipitação quando necessário.

Liou utiliza a sub-rotina PRECHK somente na época do verão onde realmente ocorrem os maiores problemas. No caso da bacia do Rio Imbé ela é utilizada durante o ano todo porque embora os maiores problemas tenham ocorrido no verão, onde ocorrem as maiores precipitações, também foram verificados algumas anomalias nos demais meses.

Dois itens foram usados para testar as discrepâncias entre a vazão e a precipitação registrada. Um, foi o aumento da vazão registrada (RFRISE) e o outro o aumento da precipitação no dia correspondente (RWRAIN).

RFRISE é o aumento do volume da vazão durante o corrente dia sobre o valor do dia anterior, RWRAIN é a precipitação registrada para aquele dia, estimada da precipitação horária acumulada.

Por processo de tentativas Liou estipulou, empiricamente, equações para correção dessas anomalias, acrescentando precipitação ou diminuindo-a quando necessário.

Essas equações foram corrigidas para a bacia

do rio Imbê, onde por exemplo:

- Se em algum dia RFRISE exceder 25,4 mm e RWRAIN for menor do que 12,7 mm, indica que houve um aumento de vazão signifi  
cante mas muito pouca ou nenhuma precipitação foi registra  
da o ajustamento é feito acrescentando-se uma quantidade de preci  
pitação RAA, onde

$$RAA = RFRISE \times 2,0 - RWRAIN + 1,0 \quad (III.18)$$

- Se RFRISE exceder 2,54 mm e RWRAIN for menor do que RFRISE  
e ainda RFRISE for menor que 1,27 mm é uma indicação que houve  
um aumento significante de vazão o qual excedeu a precipitação  
registrada, a precipitação registrada então é multiplicada por  
RAM onde:

$$RAM = 2,0 \times RFRISE / RWRAIN \quad (III.19)$$

No caso de grandes registros de precipita  
ção mas pequenos aumentos de vazão, a precipitação é reduzida  
da seguinte maneira:

1) Se RWRAIN exceder um valor máximo pré-determinado de pre  
cipitação sem runoff (RMWR) e RFRISE for menor do que 2% ' de  
RWRAIN ou RWRAIN for maior que 58,42 mm e RFRISE for menor do  
que 5% de RWRAIN a precipitação é ajustada multiplicando-a por  
RAM, onde

$$RAM = 20,0 \times RFRISE / RWRAIN \quad (III.20)$$

O valor máximo estipulado de precipitação  
sem runoff (RMWR) é de 63,5 mm para a época de chuvas e de  
76,2 mm para a época de seca.

Estes valores são proporcionais ao tamanho  
da bacia - quanto maior a bacia maiores serão estes valores,

uma vez que mais chuva é requerida para produzir um aumento significativo de vazão, em grandes bacias.

2) Se RWRAIN for maior que 38,1 mm e RFRISE for menor que 5% de RWRAIN e se for o período de seca ou seja, se o dia estiver entre o fim de fevereiro até agosto a precipitação é ajustada multiplicando-a por RAM, onde

$$RAM = 10,0 \times RFRISE / RWRAIN \quad (III.21)$$

### III.3 - Descrição dos Dados de Entrada

Os dados de entrada requeridos dividem-se em 4 grupos.

- Dados especificando as opções do programa
- Dados descrevendo os eventos climatológicos
- Histograma tempo-área para a bacia em estudo
- características físicas da bacia

Os valores iniciais dos parâmetros a serem otimizados, são estipulados dentro do modelo, bem como os dados de umidade inicial.

Inicialmente o modelo foi rodado arbitrando-se valores iniciais para esses parâmetros. A partir daí pode-se ter uma ideia do valor mais próximo para cada um deles, chegando-se aos seguintes valores

$$\begin{aligned} LZC = 100; \quad BMIR = 400; \quad SUZC = 0,60; \quad ETLF = 0,15; \quad BUZC = \\ 0,80; \quad SIAC = 0,90; \quad BIVF = 0,60; \quad BFRC = 0,941; \quad IFRC = 0,3862 \\ CSRX = 0,98; \quad FSRX = 0,98 \text{ e } NCTRI = 10. \end{aligned}$$

Para umidade inicial: LZS = 50 e GWS = 0,248

O ano hidrológico utilizado para inicializar o processo de calibração foi de setembro de 1976 até agosto

de 1977, onde verificou-se um período de seca (junho a agosto de 1976) bem caracterizado, daí OFUS (reservatório de escoamento superficial), OFUSIS (reservatório de escoamento superficial em superfície impermeável), UZS (reservatório superior), IFS (armazenamento sub-superficial), URHF (reservatório de escoamento direto) serem igualados a zero.

Embora os parâmetros otimizados no modelo OPSET sejam baseados em um ano de dados, muitos anos podem ser manuseados em uma simples rodada do programa. A variável NSYT especifica o número de anos incluídos numa rodada. Sendo cada ano uma operação unitária independente, o número total de anos não afetará o resultado para qualquer outro ano.

Para cada ano um cartão título, NSYT e os seguintes dados apresentados no ítem III.3.1 são lidos.

### III.3.1 - Opções de Controle

A primeira opção de controle foi alterada no modelo, para uma melhor adaptação da bacia em estudo.

A opção 1 anteriormente estava relacionada a entrada de dados de evaporação anual e a sub-rotina EVPDAY.

Esta sub-rotina tinha como função distribuir a evaporação anual em evaporação diária, mas como esses mesmos dados foram adquiridos em bases diárias, a sub-rotina EVPDAY foi eliminada bem como o significado da OPÇÃO 1, economizando assim tempo computacional. A opção 1 passou a refletir a opção de leitura e saída de dados em medidas inglesas ou medidas métricas.

CONOPT(1) é igual a zero se forem medidas métricas e igual a 1 se forem medidas inglesas.

A opção 2 corresponde a propagação de onda no canal ser feita em intervalos de 15 minutos ou 1 hora. No caso da bacia do rio Imbé esta propagação é feita em bases horárias devido ao tamanho da bacia.

CONOPT(2), foi lido igual a 1.

A opção 3 indica se houve alteração no lugar ou na hora da leitura da precipitação no posto pluviométrico.

CONOPT(3), foi lido como 1 porque houve alteração na hora da leitura.

Os dados de entrada foram lidos em formato livre.

### III.3.2 - Dados Climatológicos

Foram utilizados 3 anos para a calibração do modelo, de setembro de 1976 até agosto de 1979.

#### III.3.2.1 - Precipitação Horária

Os dados de precipitação horária (mm) foram obtidos no posto Sossego localizado na parte mais central da bacia, bem como o valor do parâmetro de RGPMB que é a relação entre a precipitação média registrada na bacia e a registrada pelo posto.

#### III.3.2.2 - Precipitação Diária

Os dados de precipitação diária (mm) obtidos do posto fazenda Laranjeiras foram utilizados para ajudar nas correções de algumas anomalias nos dados de precipitação horária x vazões registradas (sub-rotina PRECHK). Um fator de ponderação para este posto é especificado como dado de entrada (WSG). Este fator foi calculado pelo método de Thiessen. WSG é igual



a fração da área total da bacia em relação ao bissetor do lado secundário do posto pluviométrico.

Como os dados desse posto secundário são lidos em bases diárias, a hora da leitura é incluída (SGRT), como dado de entrada.

Devido a hora da leitura ter mudado de 9:00h para às 7:00 h nos anos de 1976/1977 e 1977/1978, um segundo valor para SGRT é lido como SGRT2 especificando a nova hora da leitura e o mesmo valor de WSG é lido como WSG2, devido ao posto não ter alterado seu lugar. O dia da alteração (SGMD) também é lido.

### III.3.2.3 - Dados de Evaporação

O modelo usa dados de evaporação de lagos para estimar as perdas por evapotranspiração.

Foram utilizados dados diários de evaporação. O fator de conversão da evaporação para evaporação de lagos foi retirado da revista Saneamento (DNOS) (1979).

Como a evaporação da panela diária foi utilizada, o coeficiente de evaporação da panela mensal é lido iguala 1.

Como já foi dito anteriormente, os dados de evaporação foram lidos em formato livre, da seguinte maneira:

- valores da evaporação para cada dia para o primeiro mes do ano hidrológico, que é setembro, em mm.

- (0,1), o valor de "0" é lido para indicar que o mês lido tem 30 dias e o valor "1" para indicar que o mês seguinte tem 31 dias.

- valores de evaporação para cada dia do mes de outubro.

- (1,0), o valor "1" é lido para indicar que os mes lido tem 31 dias e o valor "0" para indicar queo mes seguinte tem 30 dias.

E assim, sucessivamente para os meses restantes, sendo que para o mês de fevereiro o valor é igual a "2" para indicar que o mes tem 28 dias ou 29 caso o ano seja bisexto.

#### III.3.2.4 - Dados de Vazão Diária

São lidos da mesma forma dos dados de evaporação em  $m^3/s$

#### III.3.2.5 - Histograma tempo-área

O tempo requerido para o escoamento viajar para jusante é determinado pelo atraso da vazão através do uso do histograma tempo-área. Efeitos do armazenamento no canal são verificados pela propagação da vazão através de reservatórios de armazenamento teóricos. O histograma tempo-área separa a bacia em zonas por isócronas de tempo de viagem até o exultório. O número de zonas dentro da bacia depende do incremento de tempo usado na propagação e do tempo de concentração. Podem ser usados 15 minutos ou 1 hora para o tempo da propagação. Devido a bacia do rio Imbé ter uma área grande, foi utilizado 1 hora como incremento de tempo.

O tempo de concentração para a bacia foi estimado pela expressão:

$$TC = \left( \frac{0,87 L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (III.22)$$

onde o tempo de concentração TC em horas é dado em função do

comprimento L do curso mais extenso em Km e do desnível máximo H em metros.

A velocidade média do movimento da onda de cheia até a bacia foi então calculada dividindo-se o tempo de concentração por L. A velocidade foi então multiplicada pelo incremento de tempo da isócrona desejada, produzindo a distância no rio para isócronas separadas no mapa de área. A área limitada por cada par de isócronas foi planimetrada e a fração da área total contida entre cada par foi calculada (BTRI). O histograma tempo-área é a tabulação desta fração prosseguindo na direção jusante. O número de elementos do histograma NCTRI é governado pelo tamanho da bacia e o tamanho relativo de cada elemento individual é largamente determinado pelo formato da bacia. Na entrada de dados, o número de elementos (NCTRI) e cada fração individual dos elementos (BTRI) são especificados.

O histograma tempo-área é automaticamente ajustado pelo modelo para determinar o melhor ajustamento entre a hidrógrafa simulada e a registrada. Esses valores ajustados são listados pelo modelo.

### III.3.3 - Características Físicas da Bacia

Os parâmetros do modelo são divididos em 2 categorias:

- 1) Parâmetros determinados diretamente das características físicas observadas da bacia.
- 2) Parâmetros determinados pelo modelo, através da comparação de vazões registrada e vazões sintetizadas, que já foram descritos no capítulo anterior.

As características físicas são:

Área : É a área de drenagem total da bacia em  $\text{Km}^2$ . Foi determinada diretamente do mapa topográfico da região onde está situada a bacia. Seu valor foi calculado aproximadamente igual a  $750 \text{ Km}^2$ .

FIMP : É a fração da bacia impermeável que contribui para o escoamento diretamente no rio. Entende-se por área impermeável, áreas pavimentadas, telhados, rochas expostas etc.

As áreas impermeáveis cujo escoamento escoam diretamente para áreas permeáveis não podem ser incluídas como uma porção de FIMP. Seu valor foi calculado igual a 0,000005 por se tratar de uma bacia totalmente rural, havendo apenas uma pequena cidade situada as margens de seu rio a montante chamada Trajano de Moraes.

VINTMR : É o volume de água armazenado na interceptação. Seu valor depende do tipo e da densidade da cobertura vegetal. interpolando-se de acordo com a tabela de CRAWFORD (1965), seu valor é de 3,5 mm.

GWETF : É um fator que multiplicado pela taxa corrente de evaporação potencial e pela umidade corrente armazenada no subsolo estima a taxa corrente segundo a qual plantas freatofíticas retiram umidade abaixo do lençol freático. Este valor foi considerado igual a zero por não haver praticamente desse tipo de planta na bacia.

SUBWF : É a fração de umidade que entra no reservatório subterrâneo e deixa a bacia como escoamento sub-superficial não sendo medido pelo posto fluviométrico. Este valor foi assumido igual a zero para todas as bacias estudadas por Liou. Para a bacia do Rio Imbé este valor também foi assumido igual a zero.

OFSS : É a declividade média da superfície do escoamento superficial perpendicular ao canal. É estimada por uma série de medidas feitas aleatoriamente de um grupo de pontos selecionados no mapa topográfico da bacia (m/m).

OFSL : É o comprimento médio do escoamento superficial percorrido pelo escoamento antes de alcançar o canal, é definido da mesma maneira que OFSS (m).

OFMN : É o coeficiente de Manning para o solo da superfície do escoamento superficial. Foi retirado da Tabela 3 ROSS(1970) Este valor foi tomado igual a 0,040.

OFMNIS : É o coeficiente de Manning para superfície impermeável do escoamento superficial. Também foi retirado da Tabela 3 ROSS (1970). Este valor foi tomado igual a 0,020.

CHCAP : É um índice que fornece a capacidade de armazenamento do canal. Este índice proporciona uma estimativa da vazão no exultório da bacia. É usado para indicar a necessidade de substituir-se um coeficiente apropriado de propagação do armazenamento no canal para vazões contidas, por um coeficiente apropriado para volumes muito maiores de água armazenados na planície de inundação. CHCAP também representa a vazão cuja velocidade deve ser usada no desenvolvimento do histograma tempo-área. CHCAP foi estimado a partir da seção transversal do canal do rio em unidades  $m^3/s$ .

DIV : É a vazão captada por cidades ou terceiros em  $m^3/s$ . É lido em 365 ou 366 valores individuais se requerido.

Por não haver nenhuma captação de água considerável, este valor foi tomado igual a zero.

As figuras III.2, III.3 e III.4 fornecem as hidrógrafas das vazões diárias registradas e calibradas para os três anos de calibração.

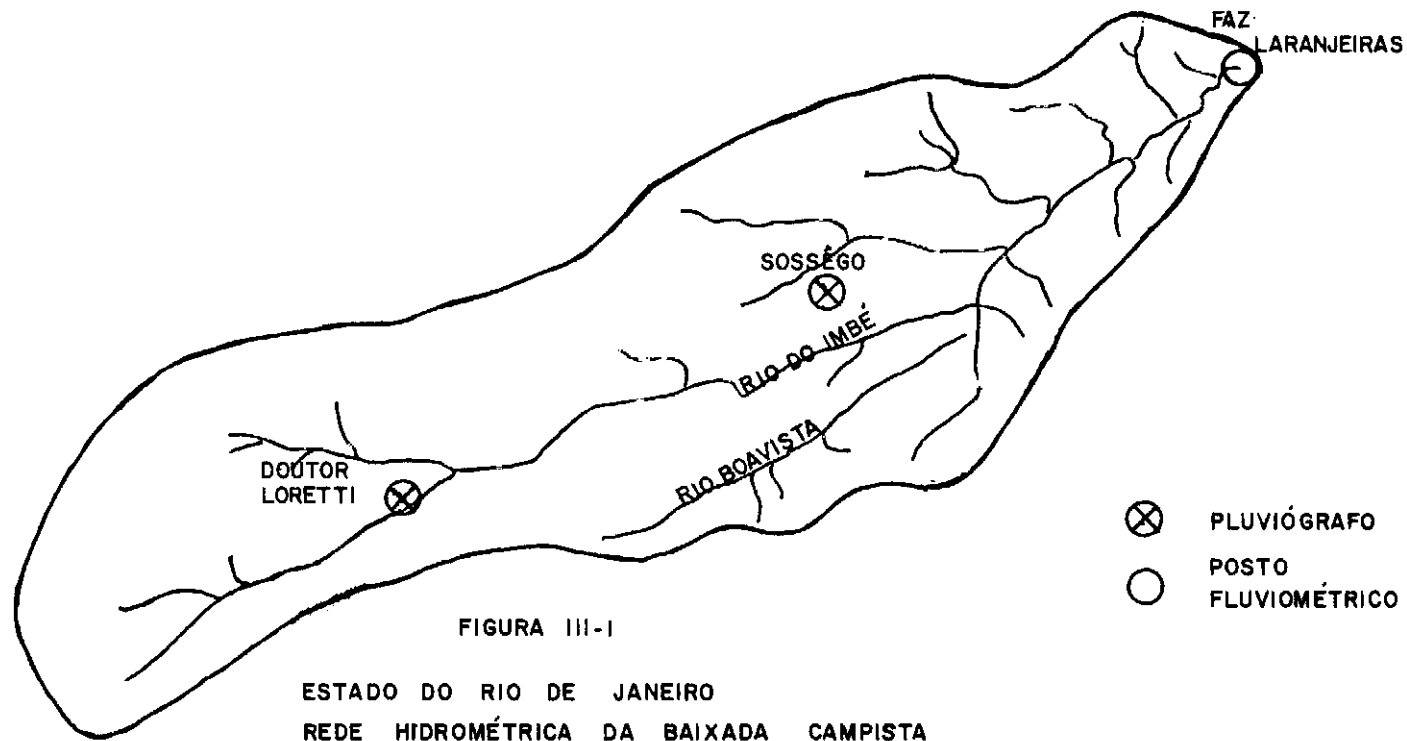


FIGURA III-1

ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
REDE HIDROMÉTRICA DA BAIXADA CAMPISTA  
SUB-BACIA DO RIO IMBÉ

- ⊗ PLUVIÓGRAFO
- POSTO FLUVIOMÉTRICO

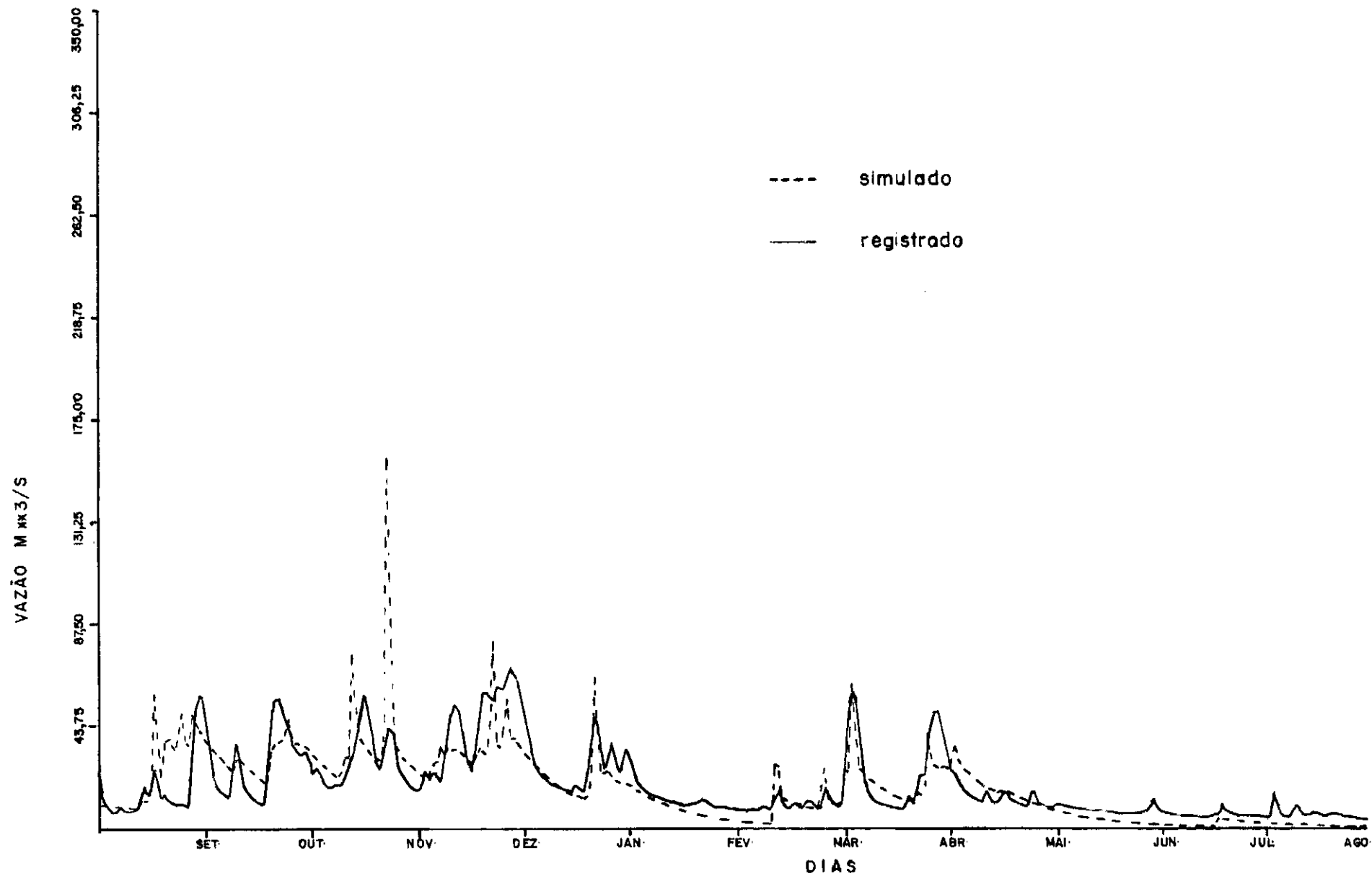


FIGURA III-2 Vazões calibradas ano 1976-1977



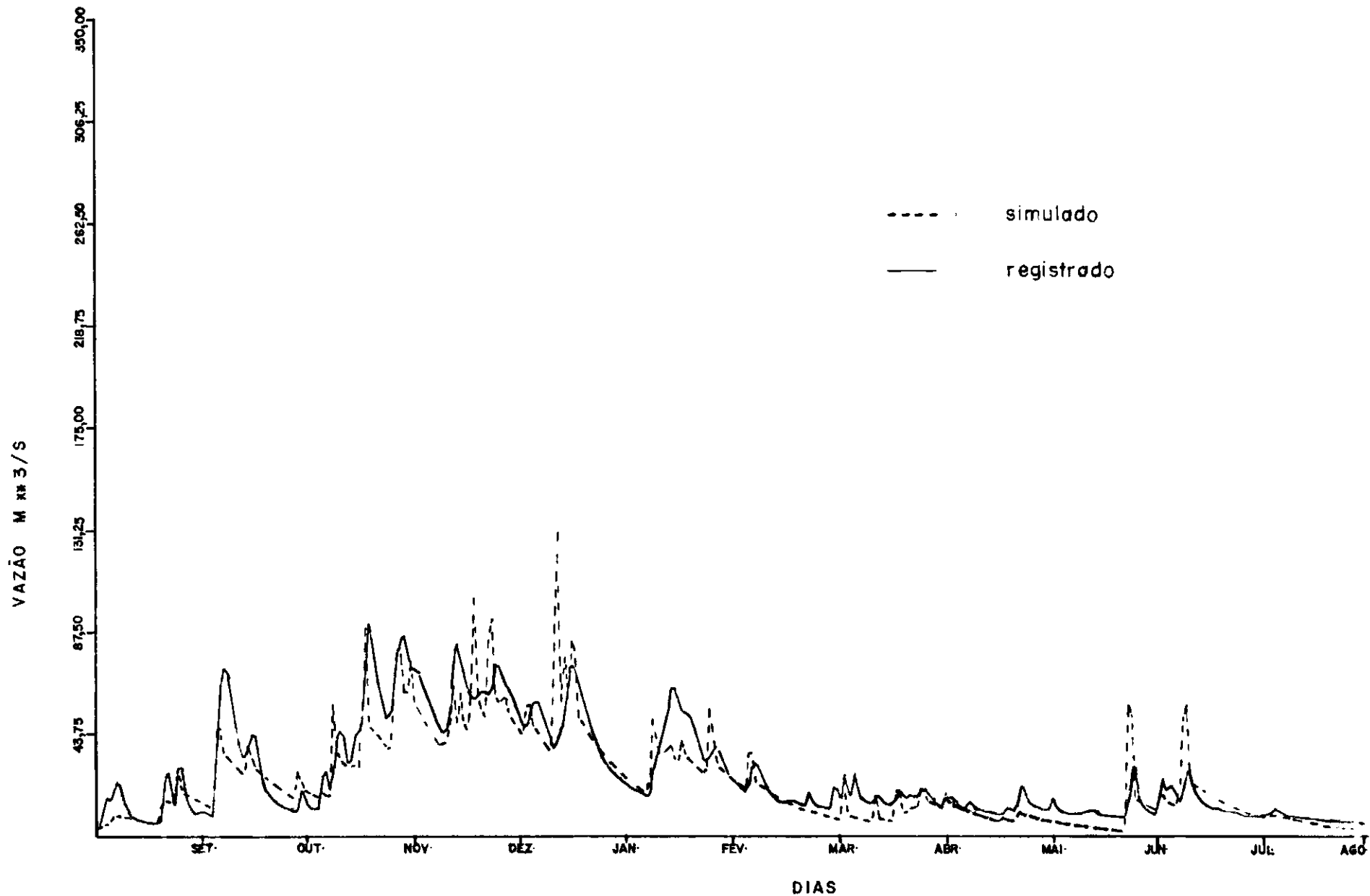


FIGURA III-3 vazões calibradas ano 1977-1978

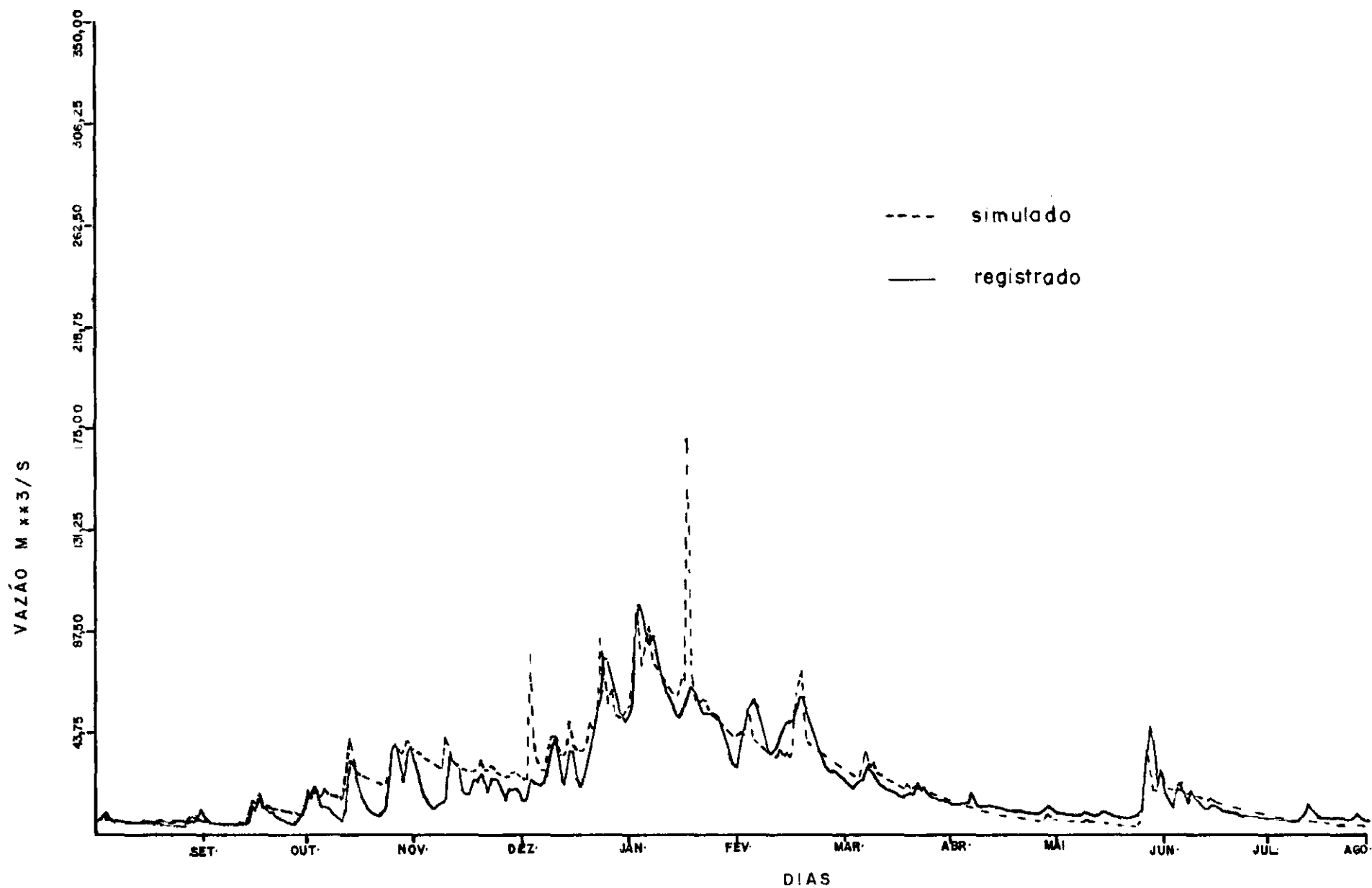


FIGURA III-4 vazões calibradas ano 1978-1979

## CAPÍTULO IV

### IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

#### IV.1 - Simulação da Urbanização na Bacia

##### IV.1.1 - Desenvolvimento

A simulação da urbanização na bacia, foi realizada através de modificações nos valores numéricos dos parâmetros do modelo para refletir as prováveis mudanças que ocorreriam nas condições de escoamento da bacia tais como: desmatamento, impermeabilização do solo, compactação, etc em consequência da urbanização.

Estas modificações nos valores dos parâmetros foram baseadas nos estudos realizados por ROSS (1970) e por JAMES (1965), onde ROSS verifica os efeitos causados pela urbanização nos parâmetros do modelo (OPSET) para duas bacias que já possuíam um pequeno centro urbano e que sofreram um considerável crescimento. A primeira passa de 1% de área impermeabilizada no período de 1945-1948 para 6% no período de 1965-1968. A segunda passa de 4% de área impermeabilizada no período de 1945 a 1948 para 10% no período de 1965 a 1968. Nos estudos realizados por JAMES que acrescenta e retira urbanização em uma bacia que apresentava-se semi-urbanizada, verificando os efeitos causados nos picos de cheia.

##### IV.1.2 - Crescimento Urbano

Para realizar o estudo do impacto ambiental

causado pela urbanização na bacia do rio Imbé que apresenta-se inicialmente rural, faz-se necessário simular um ritmo de crescimento urbano acelerado e desordenado. Este crescimento acelerado basea-se na premissa do aparecimento de indústrias, escolas, hospitais, etc que por consequência provoca uma imigração muito grande de pessoas para a região e o surgimento de grandes núcleos urbanos com suas desfavoráveis consequências hidrológicas.

A partir destas premissas a curva do crescimento populacional da região foi utilizada levando-se em consideração que grande parte dos habitantes desta região passou a concentrar-se na bacia em estudo a partir do ano de 1980.

Os dados utilizados para a confecção da curva de crescimento populacional foram adquiridos nos censos de 1950, 60, 70 e 80 levantados pelo IBGE.

Para elaboração desta curva, um diagrama de dispersão foi construído, colocando-se na abcissa as datas ou tempos tomados em relação à origem "0" e na ordenada as populações correspondentes. Para verificar-se uma relação linear no diagrama, estes pontos foram plotados em papel quadriculado monolog onde apenas Y está em escala logarítmica, obtendo-se então uma equação do tipo exponencial (equação IV.1)

$$Y = a.b^x \quad (IV.1)$$

A curva foi então ajustada pelo método dos mínimos quadrados, chegando-se a equação IV.2 que é a equação da reta do crescimento populacional da região quando Y é medido na escala logarítmica.

$$Y = 0,03X - 54 \quad (IV.2)$$

onde Y é igual ao logarítimo do número de habitantes e X o ano correspondente.

#### IV.1.3 - Distribuição do Uso do Solo

Para simular a urbanização na bacia fez-se necessário definir-se a forma de ocupação dos espaços urbanos bem como sua taxa de ocupação.

A forma de ocupação é definida em função do uso do solo urbano que caracteriza-se segundo sua atividade predominante, dividindo-se na maioria das vezes em usos residenciais, industriais, comerciais e etc. Tais usos preenchem todo o espaço urbano em diferentes proporções de área, na qual boa parte torna-se impermeável. Embora estas percentagens de áreas impermeáveis não obedeçam valores constantes pré-estabelecidos para cada forma de ocupação, procurou-se seguir valores recomendados por alguns autores que auxiliassem no cálculo da área total impermeável para uma bacia em processo de expansão.

A distribuição do uso do solo urbano foi então estabelecida de acordo com determinadas cidades paulistas, por terem elas as características de cidades que experimentaram um rápido processo de crescimento urbano, que conforme CELSON FERRARI (1979) apresentam a seguinte distribuição mostrada na Tabela IV.1

FINS	PERCENTAGEM DA ÁREA URBANA  %	PERCENTAGEM DA ÁREA IMPERMEÁ- VEL  %	PRODUTO  %
Residenciais	57,7	70	40
Comerciais	4,4	95	4
Industriais	15,6	40	6
Instituições e Serviços Públicos	2,1	85	2
Áreas ver- des de uso público	8,4	0	0
Circulação	11,8	90	11
Total de área impermeabilizada			63

Tabela IV.1 - Distribuição do uso do solo

Na Tabela IV.1 obtemos a percentagem total de área impermeabilizada da bacia. A partir deste total pode-se estabelecer a fração da área impermeável da bacia (FIMP), para cada grau de urbanização igual a 0,63 u, sendo o grau de urbanização "u" definido como a fração da área total da bacia destinada a usos urbanos ou destinada a área urbanizada.

A área urbanizada da bacia é calculada em função da densidade demográfica média urbana das cidades acima mencionadas que de acordo com CELSON FERRARI (1979) é em torno de 50 habitantes para cada 0,01 Km<sup>2</sup> e da projeção futura da população retirada da curva de crescimento populacional definida anteriormente.

Assim a Tabela IV.2 foi obtida onde o número de habitantes para o primeiro ano foi retirado do censo de 1980 e para os demais, da curva de crescimento populacional da região. A área urbanizada foi calculada, dividindo-se o número de habitantes pela densidade demográfica média. O grau de urbanização foi obtido, dividindo-se a área urbanizada pela área total da bacia e a percentagem de área impermeável, foi obtida; multiplicando-se o grau de urbanização pelo valor 0,63, calculado na Tabela IV.1.

ANO	NÚMERO DE HABITANTES	ÁREA URBANIZADA (Km <sup>2</sup> )	GRAU DE URBANIZAÇÃO (u)	PERCENTAGEM DE ÁREA IMPERMEÁVEL FIMP
1980	3000	1	0,00	0,00
2000	1000000	200	0,27	0,17
2010	2000000	400	0,53	0,34
2019	3700000	740	0,97	0,62

Tabela IV.2 Área Impermeabilizada  
em função do número de habitantes.

#### IV.1.4 - Alteração das Contantes do Modelo com a Urbanização da Bacia

Visando inicialmente verificar-se a dependência dos parâmetros do modelo com o grau de urbanização em relação a hidrógrafa de cheia, dois processos de urbanização diferentes foram simulados. No primeiro variou-se a fração impermeabilizada da bacia juntamente com os demais parâmetros em função do grau de urbanização, no segundo variou-se apenas a fração impermeabilizada mantendo-se os demais parâmetros constantes. comparando-se as hidrógrafas obtidas pelos dois estudos pode-se observar que ambas apresentaram-se bem semelhantes, isto é, a altura dos picos de cheia e o volume anual total escoado de um e de outro, não apresentaram diferenças consideráveis. A partir daí pode-se concluir que os efeitos da urbanização são mais dependentes da fração impermeável da bacia que de outro parâmetro qualquer.

Mas embora estas conclusões tenham sido chegadas, as seguintes observações devem ser apreciadas, levando-se em consideração que determinadas características físicas da bacia são totalmente modificadas com o crescimento das áreas urbanas.

Devido ao crescimento urbano por exemplo áreas anteriormente cobertas por vegetação tornam-se impermeáveis, diminuindo a capacidade de infiltração do solo e a resistência ao escoamento, acarretando no aumento do volume d'água escoado superficialmente para um mesmo volume precipitado e também no aumento da velocidade de escoamento da água. Este acréscimo de velocidade tende a diminuir o tempo de concentração fornecendo



consequentemente hidrogramas com picos maiores e mais constantes.

De acordo com JAMES (1965) o histograma tempo-área deve ser avançado de 1 hora (NBTRI, BTRI) para refletir a provável instalação de coletores de águas pluviais e o aumento da velocidade do escoamento d'água que ocorrem quando do crescimento de uma área urbana.

A interceptação máxima horária (mm/hora) e o armazenamento nas depressões (mm) (VINTMR, BUZC) devem ser reduzidas com a urbanização devido a redução das depressões naturais vegetação etc.

Segundo ROSS (1970) o parâmetro da capacidade de armazenamento da zona superior do solo (BUZC) é o mais sensível à urbanização da bacia devido a estas drásticas mudanças que ocorrem na superfície do solo quando este sofre um acelerado processo de urbanização, isto é, as depressões naturais bem como as vegetações rasteiras que antes existiam desaparecem para dar lugar as superfícies lisas impermeáveis que praticamente não conseguem reter umidade.

ROSS pode observar em seu estudo que o valor numérico deste parâmetro diminuía a medida em que a fração de área impermeável aumentava e os demais parâmetros embora menos sensíveis também sofriam algumas alterações.

A capacidade de armazenamento de umidade na zona inferior do solo (LZC) (mm) diminui com o aumento das construções urbanas e das atividades humanas de compactação da superfície da bacia reduzindo a porosidade do solo tornando mais difícil o armazenamento da umidade nas suas camadas pro

fundas.

O parâmetro que mede a taxa básica máxima de in filtração na bacia (BMIR) (mm/hr) reduz-se com a compactação e impermeabilização do solo.

As perdas por transpiração (ETLF) diminuem a me dida que a vegetação é retirada para dar lugar as construções.

A capacidade sazonal de armazenamento de umida de na zona superior do solo (SUZC) tende a ser muito pouco sensíí vel a urbanização, porque este parâmetro está diretamente relala cionado com as estações do ano, e como na bacia em estudo a va riação das estações não são muito significantes, o valor deste parâmetro tende a permanecer praticamente constante mesmo depois da urbanização.

A constante de ajustamento sazonal da infiltra ção (SIAC) também está diretamente relacionada com as variações climáticas das estações do ano e tal como SUZC, tende a permanece cer constante mesmo depois da urbanização.

O valor da constante de recessão do escoamento básico (BFRC) tende a aumentar com a urbanização da bacia, possií velmente devido à possíveis vazamentos de alguns sistemas de distribuição de água, sistemas de drenagem e drenagem de fossas sépticas que normalmente ocorrem em áreas urbanas.

O valor numérico do índice que controla o tempo de distribuição e a quantidade de água entrando no escoamento sub-superficial (BIVF), foi caracterizado pela quase inexistên cia de escoamento sub-superficial, podendo-se assim assumir um valor nulo para este parâmetro com o decorrer da urbanização.

O valor numérico da constante de recessão do escoamento sub-superficial (IFRC) também caracteriza a quase inexistência de escoamento sub-superficial, podendo-se assumir praticamente o mesmo valor para este parâmetro antes e depois da urbanização.

A partir destas considerações e baseando-se nos valores encontrados por ROSS (1970), os valores numéricos dos parâmetros foram alterados proporcionalmente, para cada grau de urbanização, a partir da média dos valores numéricos dos parâmetros calibrados para os 3 anos utilizados na calibração, determinando-se para esses valores, o grau de urbanização igual a zero ou seja a bacia totalmente sem urbanização.

A média dos valores de cada um dos parâmetros de acordo com ROSS (1970) foram calculados como:

- A média aritmética dos 3 anos de calibração para LZC, BMIR, SUZC, ETLF, BUZC e BIVF.
- A média ponderada dos valores anuais de BFRC e IFRC em função do número de dias usado para o seu calculo na calibração.
- A média ponderada dos valores anuais de NCTRI em função dos picos de cheia lidos e aceitos pela sub-rotina SETHRP
- A média ponderada dos valores anuais de CSRX em função do número de picos de cheias lidos e aceitos na sub-rotina SETHRP.
- A média ponderada dos valores anuais de FSRX em função do número de picos de cheia lidos e aceitos na sub-rotina SETHRP e a qual os picos simulados sejam superiores a

capacidade de armazenamento do canal na saída da bacia  
(CHCAP)

A Tabela IV.4 apresentada a seguir fornece os valores numéricos dos parâmetros em função do grau de urbanização para o processo de simulação da urbanização da bacia.

PARÂMETROS DO MODELO	GRAU DE URBANIZAÇÃO			
	0,0	0,27	0,53	0,97
FIMP	0,0	0,17	0,34	0,62
VINTMR	96,52	67,56	47,24	33,02
BUZC	0,2752	0,1376	0,0688	0,0344
SUZC	0,2132	0,2120	0,2100	0,2080
LZC	60,8279	48,6613	38,9331	31,1429
BMIR	708,1926	601,9647	511,6703	434,9191
ETLF	0,0803	0,0683	0,0580	0,0493
SIAC	0,2193	0,2193	0,2193	0,2193
BFRC	0,9486	0,9688	0,9885	0,9889
BIVF	0,1972	0,0	0,0	0,0
IFRC	0,1920	0,1954	0,1954	0,1954
NBTRI	10	5	4	3
CSRX	0,9442	0,9442	0,9442	0,9442
FSRX	0,9442	0,9442	0,9442	0,9442

TABELA IV.4 - VALORES DOS PARÂMETROS VERSUS  
GRAU DE URBANIZAÇÃO

Seguindo o exemplo de que ocorre na grande maioria das cidades brasileiras que apresentam um processo de crescente expansão urbana, não foi levado em consideração obras de melhoria no leito do canal drenante, isto é, obras de regularização, pavimentação, etc, por isso como se pode obser

var na tabela IV.4, os valores numéricos dos parâmetros CSRX e FSRX, permanecem constantes mesmo com o aumento do grau de urbanização.

#### IV.2 - Resultados obtidos, Análise e Discussão

##### IV.2.1 - Resultados obtidos

Prosseguindo-se os estudos, vazões diárias foram simuladas a partir dos valores numéricos atribuídos aos parâmetros apresentados na tabela IV.4 e dos dados climatológicos disponíveis, que abrange o período de 1976-1979.

Foram obtidos a partir daí nos respectivos anos hidrológicos, pares de hidrógrafas, uma das quais representando a bacia no seu estado inicial totalmente sem urbanização e a outra representando as condições da bacia em função de cada grau de urbanização.

Estas hidrógrafas estão apresentadas nas figuras IV.1, IV.2, IV.3 mostradas a seguir.

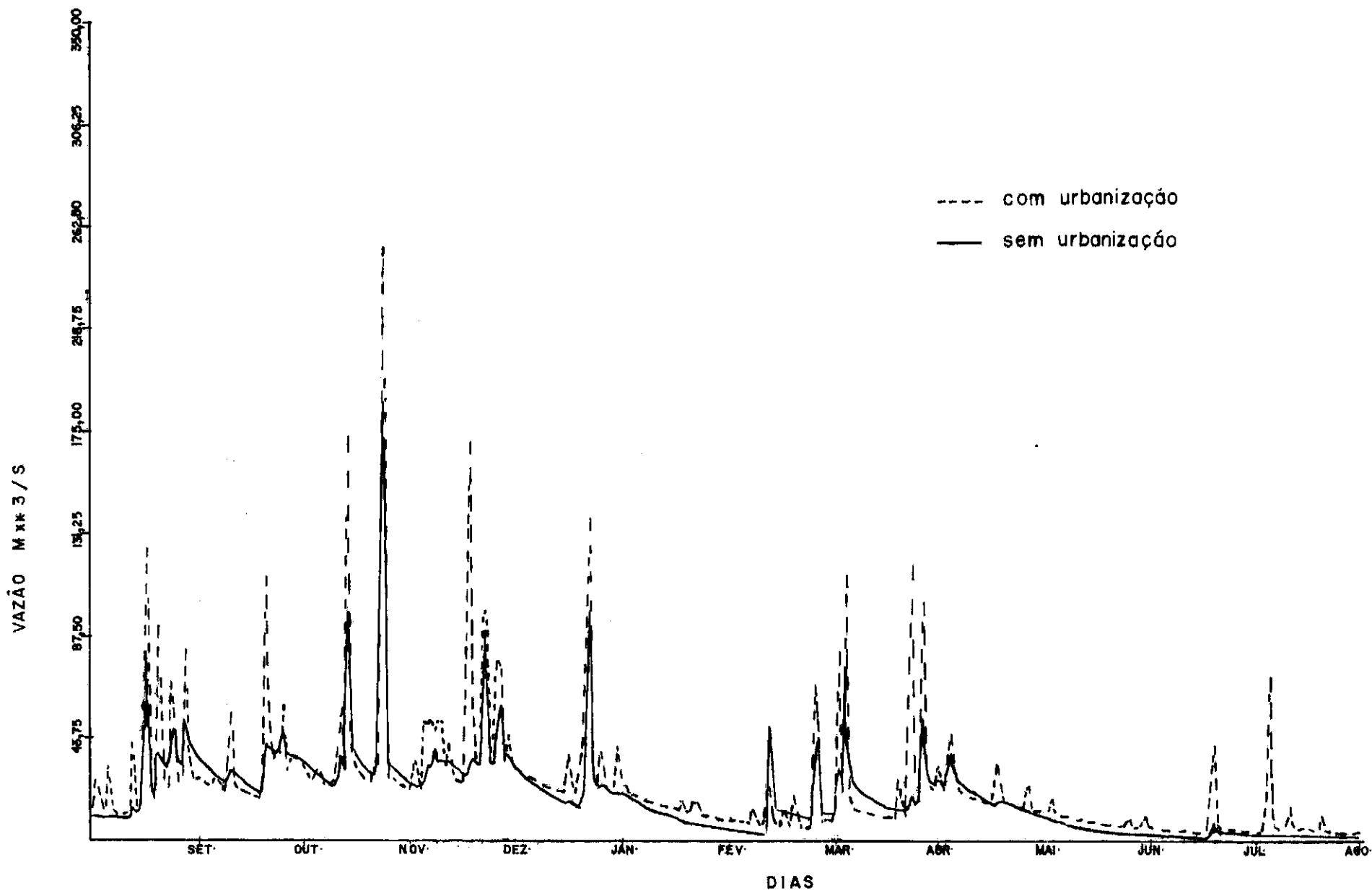


FIGURA IV-1a grau de urbanização = 0,27 ano 1976-1977

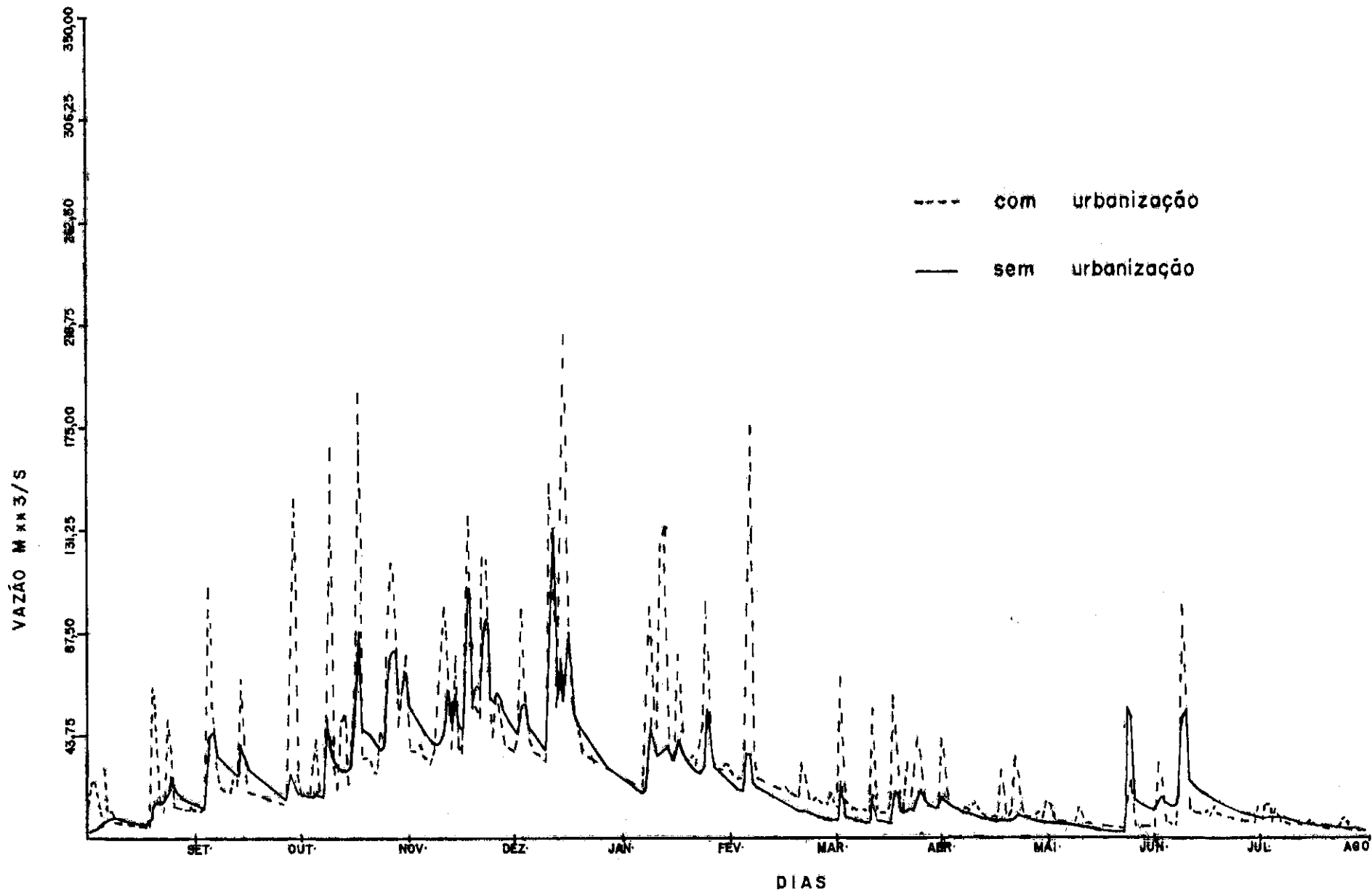


FIGURA IV.1.b grau de urbanização = 0,27 ano 1977-1978

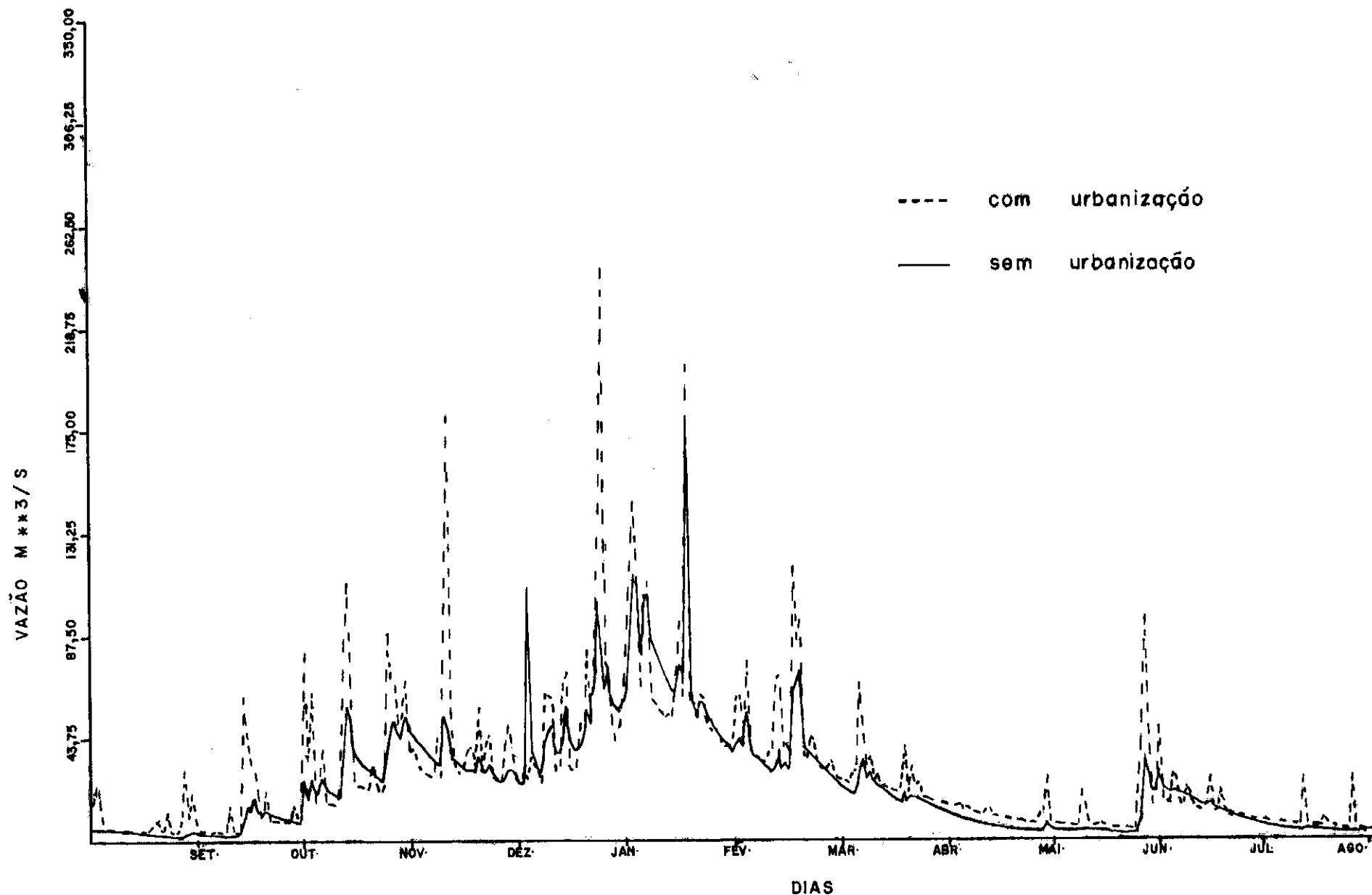


FIGURA IV-1.c grau de urbanização = 0,27 ano 1978-1979



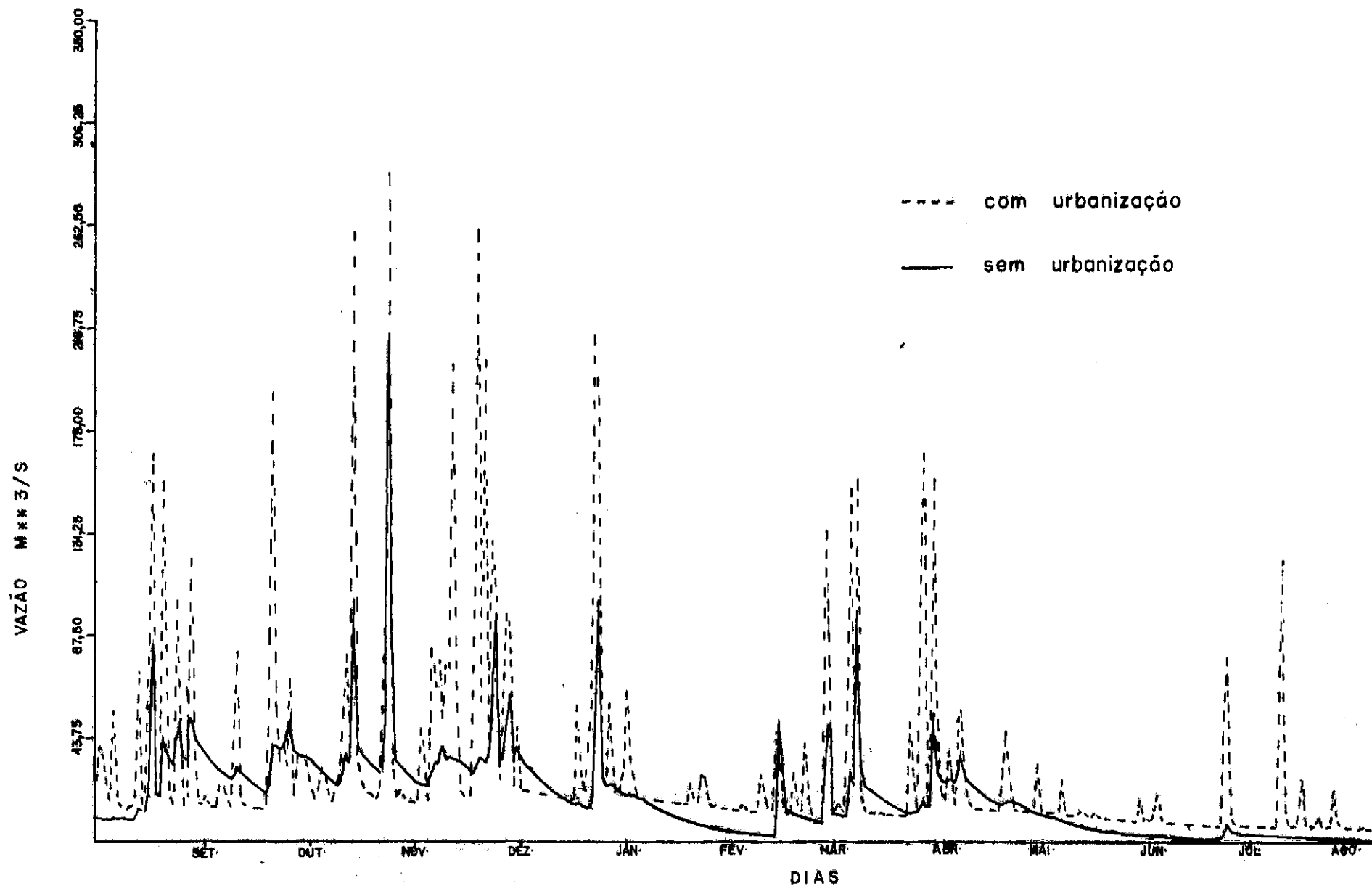


FIGURA IV-2 a grau de urbanização = 0,53 ano 1976-1977

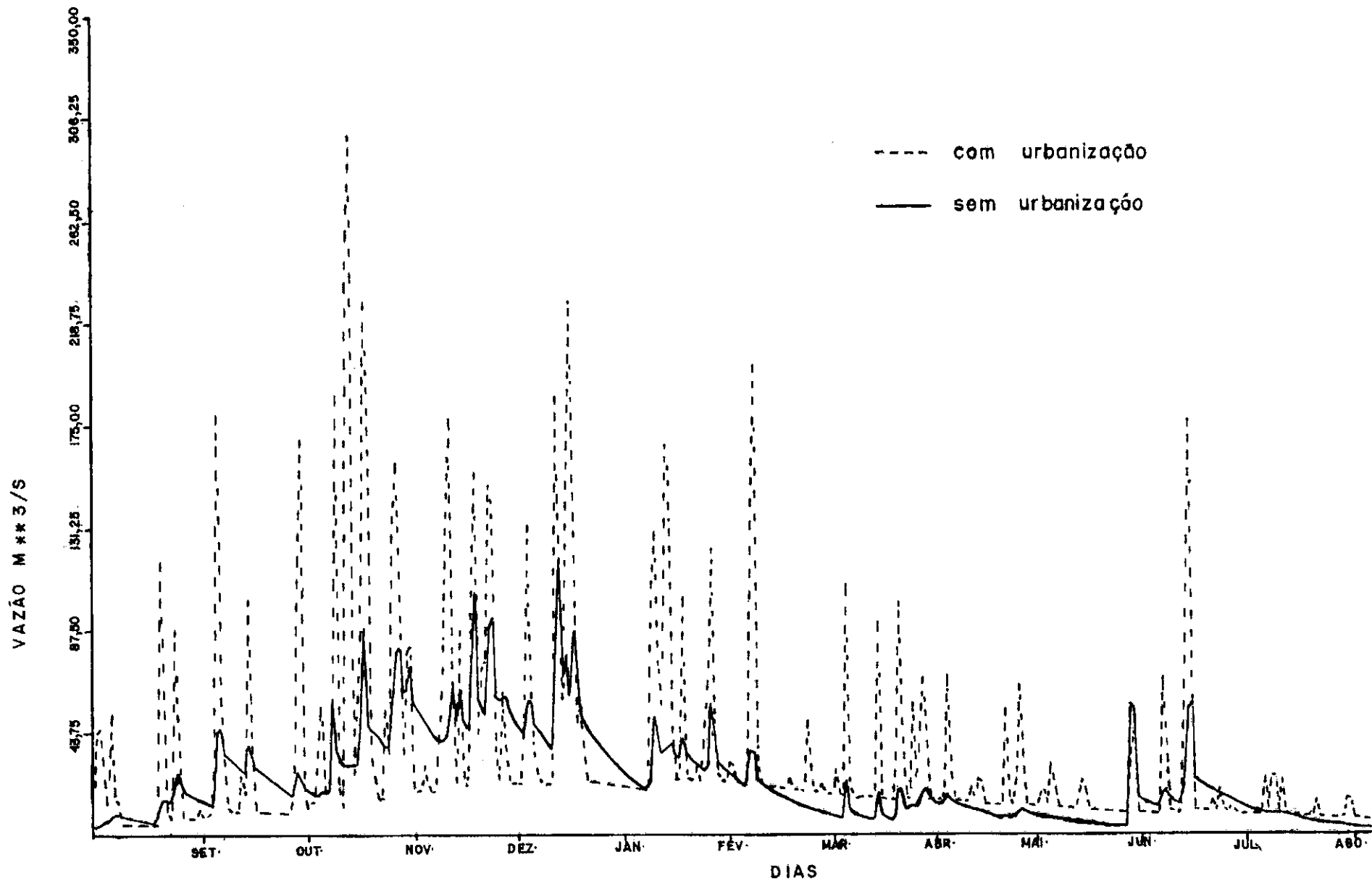


FIGURA IV-2 b

grau de urbanização = 0,53

ano 1977-1978

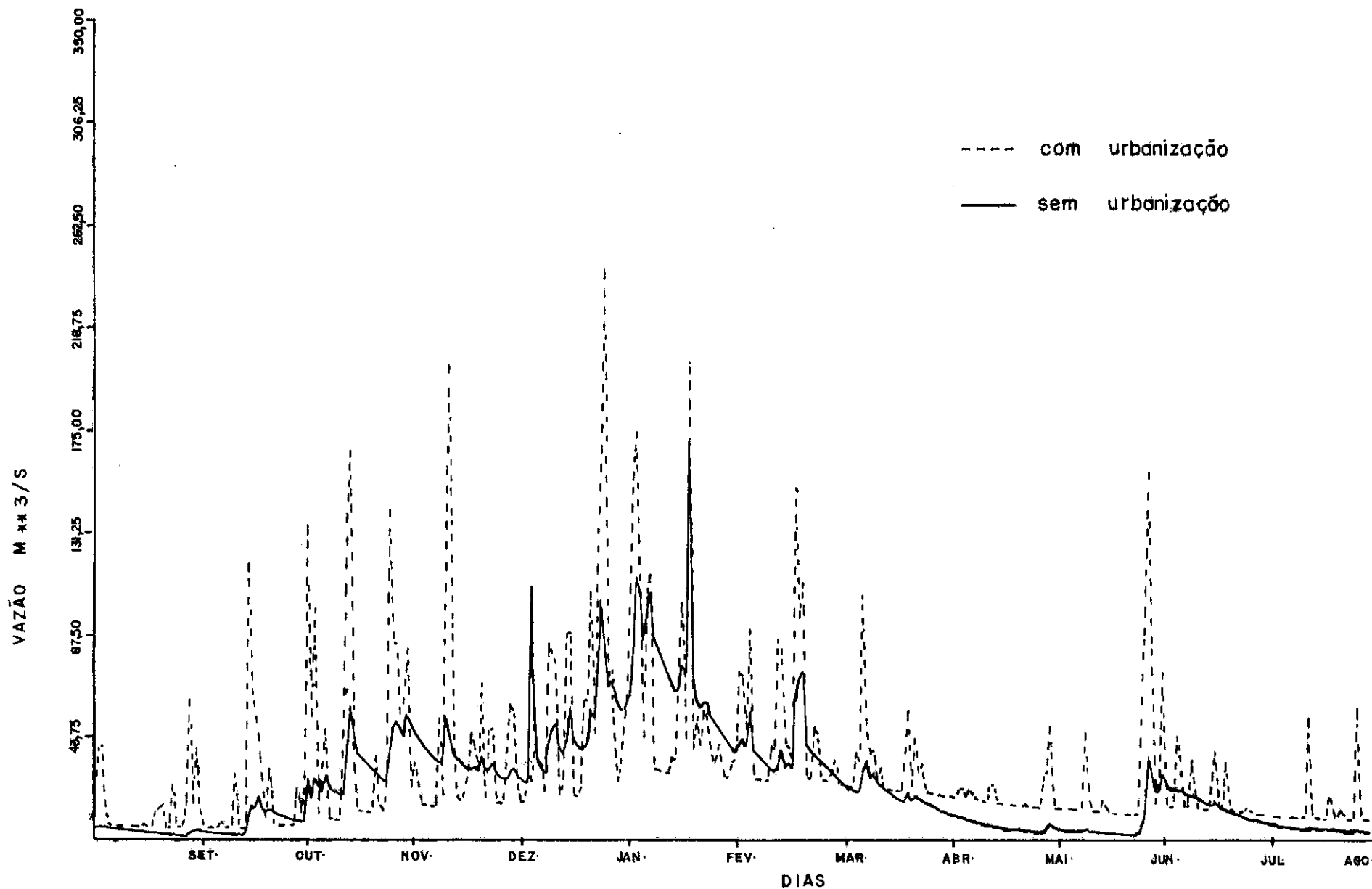


FIGURA IV-2 c grau de urbanização = 0,53 ano 1978-1979

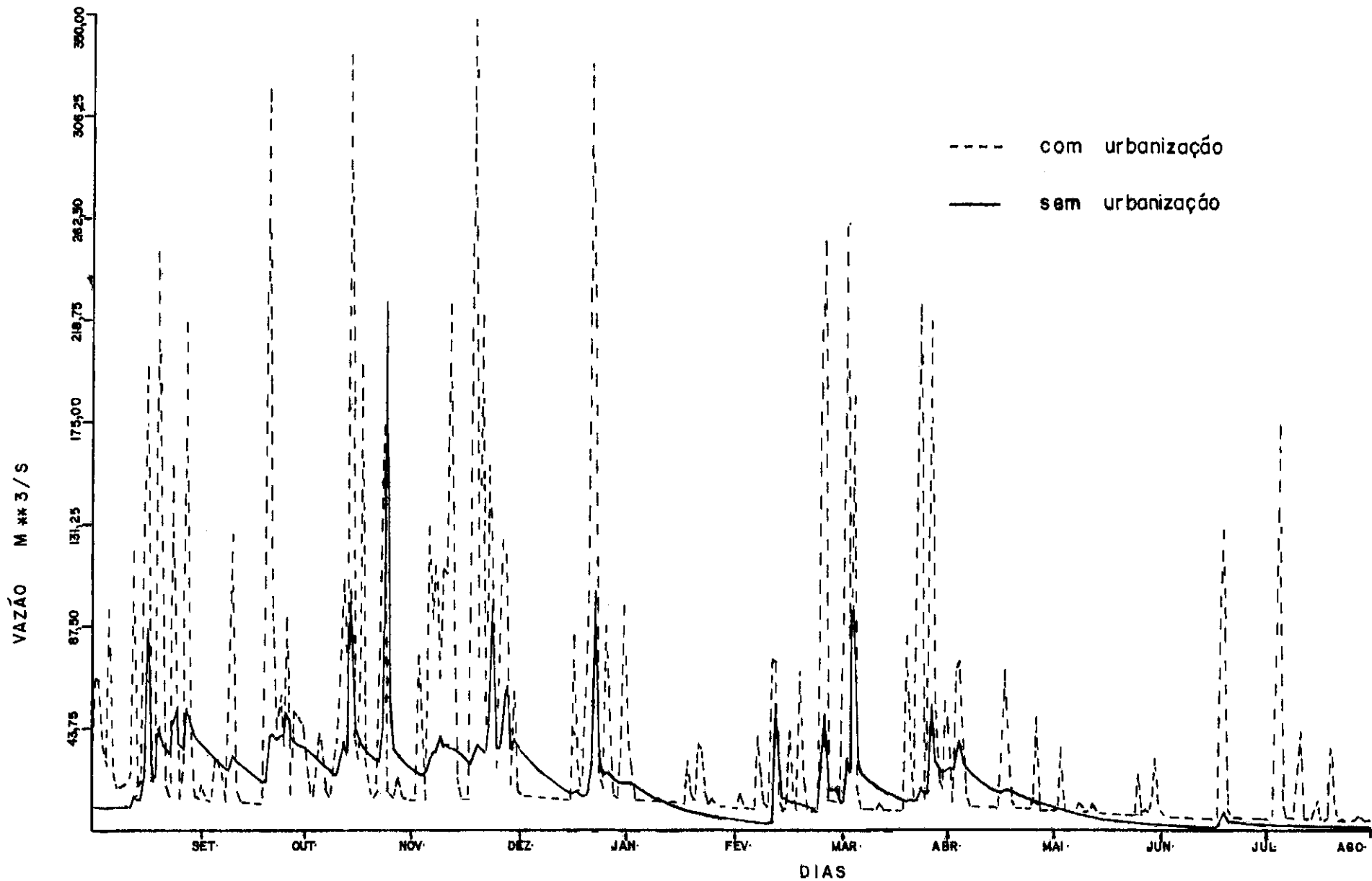


FIGURA IV-3 a grau de urbanização = 0,97 ano 1976-1977

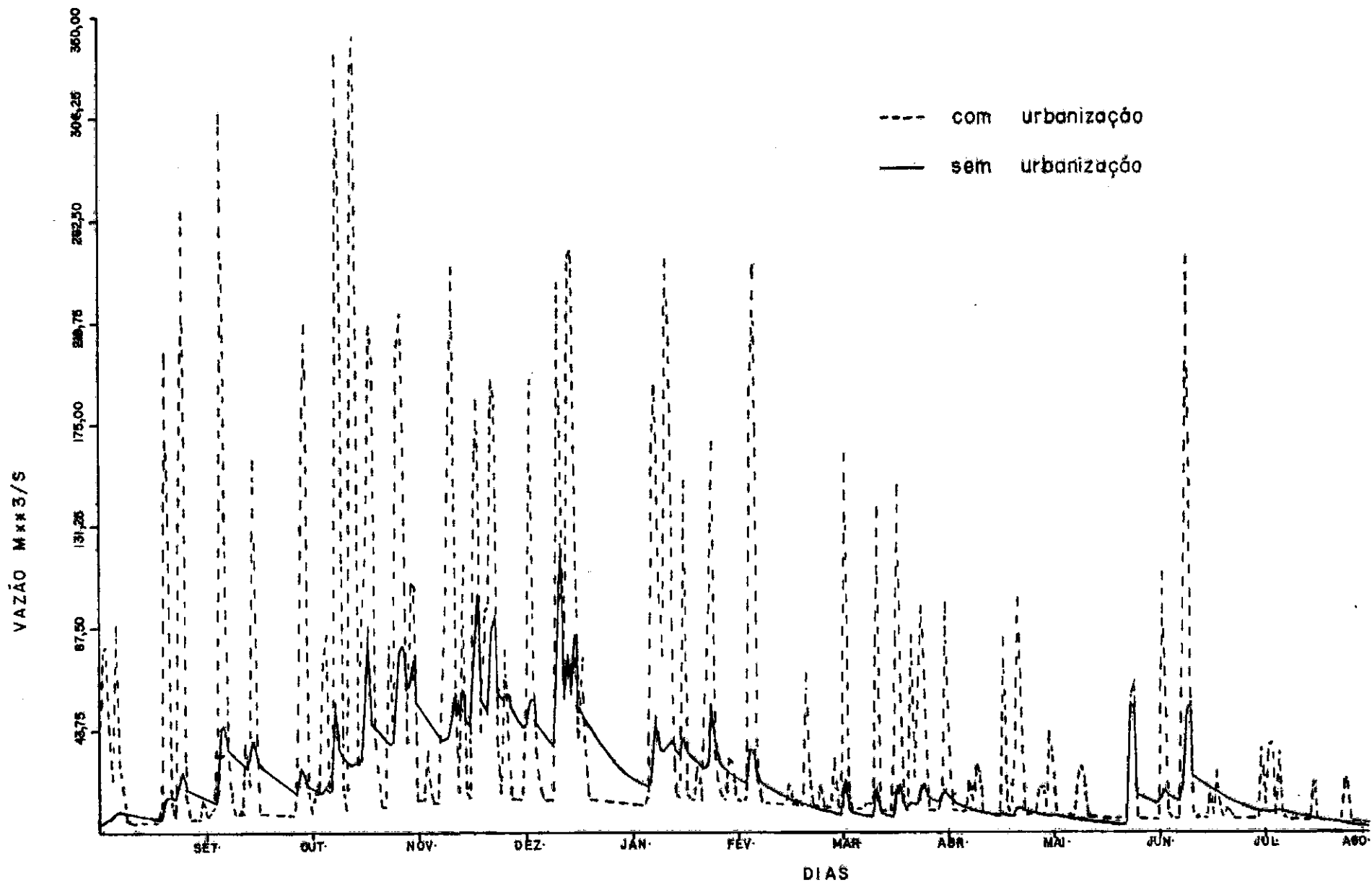


FIGURA IV-3 b grau de urbanização = 0,97 ano 1977-1978

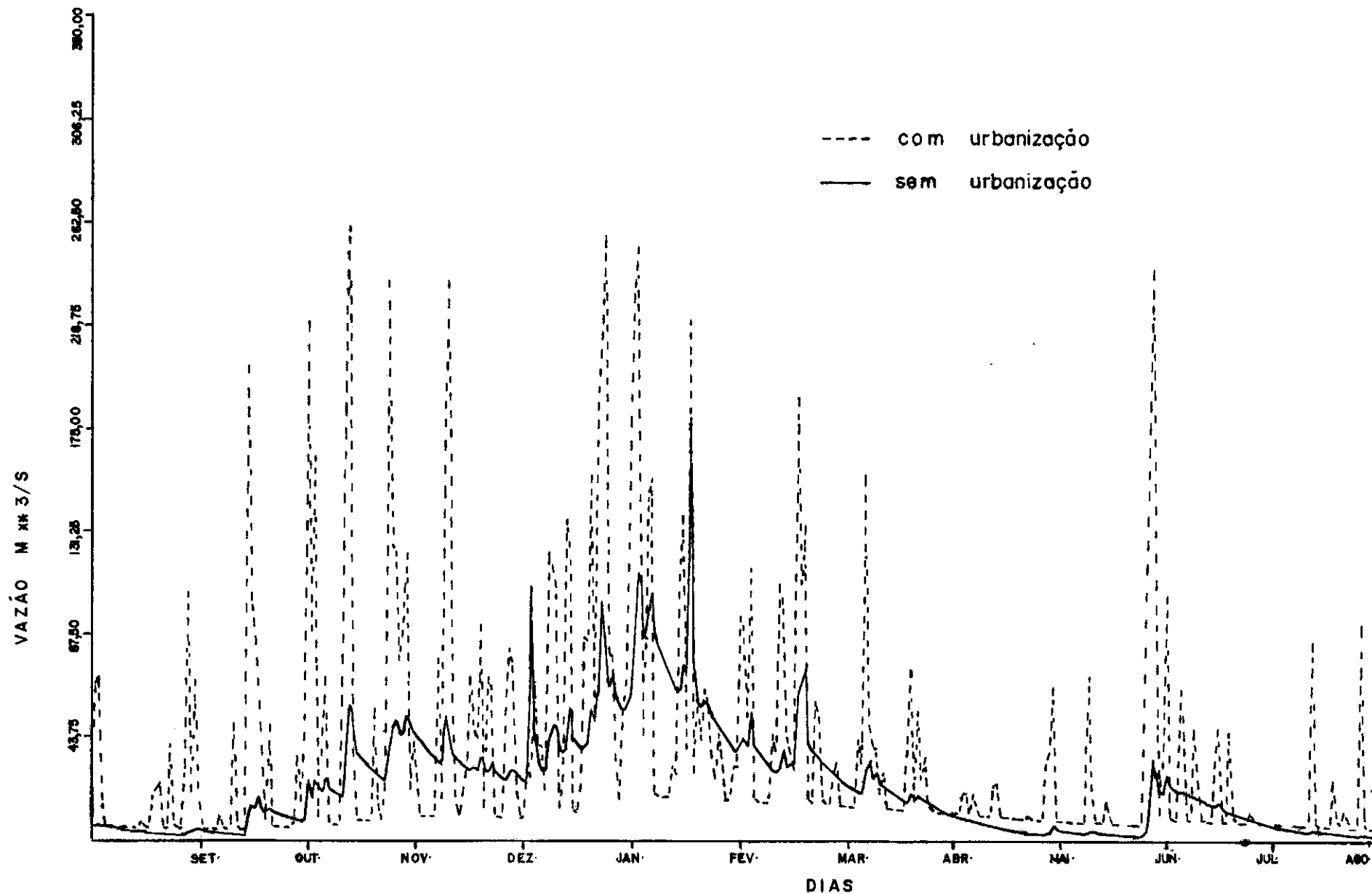


FIGURA IV-3 c grau de urbanização = 0,97 ano 1978-1979

#### IV.2.2 - Análise dos Resultados e Discussão

Um número razoável de efeitos foram observados com as modificações das condições físicas da bacia em função do processo de urbanização:

- No período estudado de 3 anos o volume total da vazão para bacia totalmente urbanizada foi em média 1,7 vezes o seu valor em condições rurais.

- O escoamento básico apresentou uma redução de aproximadamente 20% do seu valor rural para a bacia semi-urbanizada e uma redução mais pronunciada de 67% para bacia totalmente urbanizada, possivelmente devido ao grande aumento da percentagem de impermeabilização sofrida pela bacia quando esta é totalmente urbanizada.

- O escoamento sub-superficial apresentou-se inalterado, mantendo-se nulo com o decorrer do processo de urbanização.

- A maior alteração verificada com a urbanização foi no escoamento superficial que aumentou em média 12 vezes de seu valor rural para a bacia totalmente urbanizada e de 7,5 vezes para bacia semi-urbanizada.

Algumas diferenças foram verificadas comparando-se as hidrógrafas sintéticas com e sem urbanização.

- Observou-se que a relação entre o volume anual escoado em condições urbanas e o em condições rurais (R) variou inversamente com a precipitação anual. Para o período estudado de 3 anos foram obtidos os dados da tabela IV.5.

ANO	PRECIPITAÇÃO (mm)	VOLUME ESCOADO C/URBANIZAÇÃO
		$R = \frac{\text{VOLUME ESCOADO S/URBANIZAÇÃO}}{\text{VOLUME ESCOADO C/URBANIZAÇÃO}}$
76-77	1802	2,0
77-78	2013	1,58
78-79	2010	1,56

TABELA IV.5 - VALORES DA RELAÇÃO R VERSUS  
PRECIPITAÇÃO

A relação entre o volume do escoamento em condições urbanas e o de condições rurais (R) também varia de mês para mês. A tabela IV.6, fornece os valores médios mensais para o período estudado, para cada grau de urbanização.

Grau de urbanização	$R = \frac{\text{Volume escoado c/urbanização}}{\text{Volume escoado s/urbanização}}$											
	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JULH	AGST
0,27	1,23	1,11	1,13	1,18	1,22	1,22	1,36	1,33	1,33	1,29	1,32	1,56
0,53	1,85	1,26	1,53	1,33	1,34	1,22	1,59	1,92	1,83	2,16	2,30	3,33
0,97	2,92	1,66	1,91	1,47	1,40	1,16	1,50	2,02	1,56	1,69	2,45	3,98

TABELA IV.6 - RELAÇÃO DO VOLUME ESCOADO PARA  
BACIA COM E SEM URBANIZAÇÃO.



Observa-se que o valor desta relação aumenta à medida que aumenta o grau de urbanização.

Pelos gráficos IV.1, IV.2 e IV.3 verifica-se que os picos de cheia flutuam mais rapidamente nas hidrógrafas com maior índice de urbanização. É notado também que no período de maio a meados de setembro, nos dias em que ocorreram precipitações consideráveis, os picos de cheias individuais aumentam, em média, mais de 8 e 3 vezes para bacia totalmente urbanizada e pouco urbanizada respectivamente. No período de setembro a abril esses picos aumentam, em média, 7 vezes, chegando em alguns casos até 15 vezes quando se considera cheias isoladas ocorridas nos meses de verão, particularmente nos dias em que ocorreram precipitações muito intensas para bacia em total estado de urbanização. Para bacia em estado de pouca urbanização este aumento ficou em torno de 4 vezes.

Verifica-se também que à medida que aumenta o grau de urbanização os picos de cheia se adiantam progressivamente. Assim, para bacia com grau de urbanização igual a 0,27 os picos ocorrem aproximadamente 2 horas mais cedo, para bacia com grau de urbanização igual a 0,53 os picos ocorrem aproximadamente 3 horas mais cedo e para bacia com grau de urbanização igual a 0,97 os picos ocorrem aproximadamente 4 horas mais cedo.

## CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## V.1 - Conclusões Gerais

O modelo utilizado para este estudo mostrou-se plenamente satisfatório, a saber:

Possibilita a previsão de ocorrência de enchentes com suas respectivas magnitudes e também a hora provável do pico de cheia e sua duração, para os diversos graus de urbanização, pelos quais passa uma bacia em contínuo processo de crescimento urbano.

Outra vantagem é a possibilidade de se poder planejar um crescimento urbano disciplinado e ordenado, com a locação de maior quantidade de áreas verdes, evitando-se as aglomerações urbanas e suas consequências desastrosas que se verificam constantemente em muitas regiões em desenvolvimento.

## V.2 - Recomendações

Alguns resultados não esperados foram encon-trados, como por exemplo, a relação (R) entre o volume total escoado para bacia com urbanização e sem urbanização. Este valor diminui em determinados meses para o grau de urbanização igual a 0,97, ao invés de aumentar, como era esperado. Isto talvez ocorreu devido à escassez de dados, ou seja, o pouco número de anos hidrológicos disponível para realização deste estudo.

Recomenda-se que este estudo prossiga para bacias que possuam um período de medição mais longo, para que se

tenha uma calibração mais exata de seus parâmetros e que tais discrepâncias sejam eliminadas.

## BIBLIOGRAFIA

- CRAWFORD, N.H.; LINSLEY, R.K. (1966) - "Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV" - Report 39-Stanford University.
- DOUGLAS, J. (1965) - "Using a Digital Computer to Estimate the Effect of Urban Development of Flood Peaks", Water Resources Research, Volume 1 (Second Quarter, 1965), pg. 223-233.
- DOUGLAS, J. (1970) - "An Evaluation of Relationships Between Streamflow Patterns and Watershed Characteristics through the Use of OPSET" - Research Report Number 36, Contract No. 14-01-0001. 1964, University of Kentucky, Water Resources Institute Lexington, Kentucky.
- DOUGLAS, J. (1972) - "Hydrologic Modelling, Parameter Estimation and Watershed Characteristics", Journal of Hydrology, Vol. 17, December, pg. 283-307.
- FERRARI, C. (1979) - Curso de Planejamento Municipal Integrado, 2.<sup>a</sup> Edição, Livraria Pioneira Editora, São Paulo, Brasil.
- HERNAM, M.R. (1975) - Drenagem Urbana e Simulação Hidrológica, 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Dezembro, Rio de Janeiro.
- LION, Y.S.E. (1970) - OPSET Program for Computerized Selection of Watershed Parameter Values for the Stanford Watershed Model, Research Report Number 34, Contract No. 14-01-0001, 1964, University of Kentucky, Water Resources Institute Lexington, Kentucky.
- LINSLEY, R.K.; KOHLEN, M.A.; PAULHUS, J.L. (1958) - "Hydrology for Engineers", McGraw-Hill.
- MACHADO, D. (1975) - "Probability-distributed Parameters Within Conceptual Catchment Models", Ph.D. Thesis, University of

Lancaster, England.

MACHADO, D. (1982) - "Simulação em Hidrologia I" - Anotações de Aula.

ROSS, A.C. (1970) - The Stanford Watershed Model: The Correlation of Parameter Values Select by a Computerized Procedure with Measurable Physical Characteristics of the Watershed, Research Report Number 35, Contract No. 14-01-0001, 1964, University of Kentucky, Water Resources Institute, Lexington, Kentucky.

SILVA, A. e PINTO, M.M. (1979) - "Evaporação em Superfícies Naturais", Saneamento, Revista Técnica e Informativa do D.N.O.S.